

Klimawandel und Sauerkirschanbau

Dissertation

**zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum agriculturalarum
(Dr. rer. agr.)**

**eingereicht an der
Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät
der Humboldt-Universität zu Berlin**

von
Philipp Matzneller

Präsident der Humboldt-Universität zu Berlin:
Prof. Dr. Jan-Hendrik Olbertz

Dekan der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät
Prof. Dr. Dr. h.c. Frank Ellmer

Gutachter/in: 1. Prof. Dr. Frank-M. Chmielewski

2. Prof. Dr. Manuela Zude

3. Prof. Dr. Massimo Tagliavini

Tag der mündlichen Prüfung: 17.07.2014

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung.....	1
2 Einleitung.....	3
3 Stand der Forschung.....	5
4 Zielstellung.....	7
5 Daten und Methoden.....	8
5.1 Charakterisierung der Standortbedingungen in den Anbauregionen.....	8
5.1.1 Rheinland-Pfalz.....	8
5.1.2 Przybroda.....	9
5.1.3 Maple City.....	10
5.1.4 Hart.....	12
5.1.5 Eau Claire.....	13
5.2 Daten.....	14
5.2.1 Phänologische Daten.....	14
5.2.2 Klimadaten.....	16
5.2.2.1 Beobachtungen.....	16
5.2.2.2 Klimaszenarien.....	17
5.3 Methode.....	19
5.3.1 Klimatische Indikatoren.....	19
5.3.1.1 Bivariate Häufigkeitsverteilung von Lufttemperatur und Niederschlagshöhe.....	19
5.3.1.2 Standardized Precipitation Index (<i>SPI</i>).....	19
5.3.1.3 Trockenperioden.....	20
5.3.1.4 Hohe Temperaturen während des Fruchtwachstums und der Blütendifferenzierung der Knospen.....	21
5.3.1.5 Temperaturverhältnisse in der Blütezeit.....	22
5.3.2 Phänologische Modelle.....	23
5.3.2.1 Chilling-Modelle.....	23

5.3.2.2 Forcing-Modelle.....	25
5.3.2.3 Optimierung und Validierung der Modelle.....	27
5.3.3 Berechnung von Frostschäden.....	30
6 Ergebnisse.....	34
6.1 Phänologische Modellierung.....	34
6.1.1 Optimierung der Modelle.....	34
6.1.2 Validierung der Modelle.....	35
6.2 Künftige Klimaänderungen	39
6.3 Klimatische Indikatoren	43
6.3.1 Bivariate Häufigkeitsverteilung von Lufttemperatur und Niederschlagshöhe.....	43
6.3.2 Standardized Precipitation Index (<i>SPI</i>).....	44
6.3.3 Trockenperioden.....	46
6.3.4 Hohe Temperaturen während des Fruchtwachstums und der Blütendifferenzierung der Knospen.....	48
6.3.5 Temperaturverhältnisse in der Blütezeit.....	49
6.4 Veränderungen in der Phänologie.....	50
6.5 Veränderungen in der Gefahr von Spätfrost.....	53
7 Diskussion und Ausblick.....	58
8 Literaturverzeichnis	63
9 Anhang	75

1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden die Veränderungen der agrarklimatologischen Bedingungen im Zuge des Klimawandels für ausgesuchte Sauerkirschanbauregionen in Europa und Nordamerika untersucht. Die klimatischen Verhältnisse ändern sich im Laufe dieses Jahrhunderts zum Teil deutlich (Mittel über 4 bis 6 Klimamodellrechnungen je Anbauregion, SRES-Szenario A1B). In allen Anbaugebieten kann mit einer signifikanten Zunahme der Jahresmitteltemperatur gerechnet werden. Dabei steigt die Lufttemperatur in den europäischen Anbauregionen im Winter am stärksten [2071-2100 gegenüber 1971-2000; Rheinland-Pfalz (DEU): +3.9 °C; Przybroda (POL): +3.7 °C], während in Michigan (USA) im Frühjahr der höchste Anstieg zu erwarten ist [2041-2070 gegenüber 1971-2000; Eau Claire: +2.3 °C; Hart und Maple City: +3.7 °C]. Der jährliche Gesamtniederschlag nimmt in den polnischen Anbaugebieten und in Michigan im Laufe dieses Jahrhundert zu, in Rheinland-Pfalz hingegen geringfügig ab. Im Jahresverlauf ergeben sich dabei einige Unterschiede. In erster Linie besteht eine Tendenz zu geringeren Niederschlagshöhen im Sommer und mehr Niederschlägen im Winter. Hierbei wurden für Przybroda (POL) die größten Veränderungen berechnet (2071-2100 gegenüber 1971-2000: Winter: +48 mm; Sommer: -42 mm).

Mit dem Standardized Precipitation Index (McKee et al. 1993) wurden die Trockenheits- und Feuchtigkeitsbedingungen im mittleren Entwicklungs- und Ertragsbildungs- (April-Juli), sowie im Blütenanlage- und Blütendifferenzierungszeitraum der Knospen (August-September) von Sauerkirschen untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass in den europäischen Anbaugebieten in Zukunft mehr trockene Jahre auftreten können, während sich die Bedingungen in Michigan nicht verändern. Wie bereits aus der deutlichen Zunahme der Lufttemperaturen hervorgeht, wird die Anzahl von heißen Tagen (Tagesmaximumtemperatur > 30 °C) in Zukunft steigen. Bis Mitte dieses Jahrhunderts (2041-2070) kann im Zeitraum April-September mit zwei bis viermal so vielen heißen Tagen als unter heutigen Bedingungen (1971-2000) gerechnet werden. Die Kombination aus Hitze und Trockenheit führt bei Obstgehölzen zu einer Abnahme der Transpirationsrate und einer geringeren Assimilation von Kohlendioxid, was im Obstbau mit kleineren Fruchtgrößen und Ertragsreduktionen verbunden ist.

Obstgehölze gelangen im Herbst in einen winterlichen Ruhezustand (Dormanz). Erst nach Erfüllen eines sorten- und artenspezifischen Kältebedürfnisses können förderliche Temperaturen im Frühjahr zur Entwicklung der Gehölze beitragen. Deswegen war es zunächst wichtig zu wissen, ob die winterlichen Bedingungen unter geänderten Klimaverhältnissen

ausreichen, um das Kältebedürfnis von Sauerkirschgehölzen zu befriedigen. Die Untersuchungen haben ergeben, dass sich der Termin zur Brechung der Dormanz zwar verschieben kann (z.B. Rheinland-Pfalz: +10 Tage), dabei jedoch das spezifische Kältebedürfnis von Sauerkirschen in allen Jahren erfüllt sein wird. Daher sollte sich die Gefahr einer Nichterfüllung des Kältereizes und daraus resultierenden Ertragsschäden in den Untersuchungsregionen in Zukunft nicht merklich vergrößern.

Zu den gefürchteten Witterungsschäden im Obstbau gehört Spätfrost, der zu hohen Ertragsverlusten führen kann. Im Zuge des Klimawandels können sich die Häufigkeit und Stärke der Fröste ändern. Da die Sensibilität der Obstgehölze gegenüber Frost mit dem Voranschreiten der Entwicklung im Frühjahr zunimmt, war es notwendig die künftigen Eintrittstermine phänologischer Stadien zu bestimmen. Dafür wurden acht Modelle zur Vorhersage des Blühbeginns und Blühendes entwickelt. Weitere phänologische Stadien konnten mit dem Modell von Zavalloni et al. (2006) berechnet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass sich der Blühbeginn unter geänderten Klimabedingungen verfrüht (Rheinland-Pfalz: -14 Tage; Przybroda: -15 Tage; Eau Claire: -6 Tage; Hart: -12 Tage; Maple City: -11 Tage), aber nur geringe Verkürzungen der Zeiträume zwischen den phänologischen Stadien zu erwarten sind.

Für die Berechnungen zur Spätfrostgefahr wurde zunächst die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Spätfrost bestimmt. Hierzu wurden alle Jahre gezählt, in denen die Tagesminimumtemperatur während der Entwicklungsphasen wenigstens an einem Tag kleiner als 0 °C war. Die Frostwahrscheinlichkeit könnte im Laufe dieses Jahrhundert in Rheinland-Pfalz (-22 %) und Eau Claire (-21 %) abnehmen, während sich die Verhältnisse in den anderen Anbaugebieten nur geringfügig ändern. In einem zweiten Schritt wurden die Ertragsverluste durch Frost bestimmt. Hierbei hat sich ergeben, dass die Frostschäden in den untersuchten Anbauregionen wahrscheinlich geringer werden. Allerdings differieren die Ergebnisse zwischen den Berechnungen mit beobachteten und modellierten Temperaturen oft stark.

Das Ausmaß der Frostschäden an Obstgehölzen hängt von der Intensität und Länge des Frostereignisses, sowie vom Entwicklungsstadium der Obstgehölze während des Frosts, ab. Bei den kritischen Schadenstemperaturen, die in der Literatur angegebenen sind, schwanken die Temperaturbereiche jedoch stark. Im Rahmen dieser Promotion wurden experimentelle Untersuchungen zur Frostempfindlichkeit von Kirschen durchgeführt, woraus neue Erkenntnisse über die Auswirkungen von Spätfrost an Kirschgehölzen gewonnen werden konnten (Matzneller et al. 2015).

2 Einleitung

Sauerkirschen werden vorwiegend in den gemäßigten Klimazonen der Nordhalbkugel angebaut. Der Großteil davon wird nicht frisch konsumiert, sondern ist zur Weiterverarbeitung bestimmt. Seit 1960 hat sich die Produktion durch das Wachstum der verarbeitenden Industrie, sowie Fortschritte in der mechanischen Obsternte nahezu verdoppelt. Im Zeitraum 2006-2010 wurden weltweit jährlich 1.28 Millionen Tonnen Sauerkirschen auf einer Fläche von 233 000 ha produziert (FAO 2013a). Die wichtigsten Anbauländer waren Russland (15 % der Weltproduktion), Türkei (14 %), Polen (14 %), Ukraine (10 %) und die Vereinigten Staaten von Amerika (10 %). Ungarn hatte mit 5 % die achtgrößte Produktion und Deutschland belegte den zehnten Platz (2 %).

Die Bewirtschaftungsformen unterscheiden sich stark zwischen den Ländern. Während in Westeuropa und den Vereinigten Staaten ein intensiver Anbau betrieben wird, dominiert in Osteuropa eine extensive Bewirtschaftung. Die höchsten Erträge werden mit 8-9 t/ha in Deutschland, Iran, Türkei und den USA erzielt, während in Tschechien, Polen und Ungarn 5-7 t/ha erwirtschaftet werden (Szabó et al. 2006). In den meisten osteuropäischen Ländern (Russland, Ukraine, Weißrussland, Serbien, usw.) sind viele Sauerkirschanlagen alt und extensiv kultiviert, woraus sich geringe Hektarerträge ergeben (2-4 t/ha).

Sauerkirschen (*Prunus cerasus*) für den Erwerbsobstbau werden in zwei Gruppen eingeteilt: „Amarelle“ und „Morello“. In Europa werden vorwiegend Sorten der Gruppe „Morello“ angebaut, während in Nordamerika „Amarellen“ dominieren. In Deutschland wird fast ausschließlich „Schattenmorelle“ produziert, nur ein geringer Anteil ist der Sorte „Heimann“ zuzuschreiben. In verschiedenen westeuropäischen Ländern (Niederlande, Schweden, Dänemark und Österreich) wird „Kelleris 16“, ein Klon der „Schattenmorelle“, angebaut. In Polen ist die Hauptsorte „Lutowka“, während in Ungarn vorwiegend die Sorten „Ujfehértói fürtös“ und „Erdi Bötermő“ erzeugt werden (Klone von „Schattenmorelle“). In Spanien, Portugal und Nordamerika dominiert die Sorte „Montmorency“ und damit gekreuzte Sorten (z.B. „Meteor“; Szabó et al. 2006, Iezzoni et al. 1991).

Die weite Verbreitung der Sauerkirsche lässt geringe Standortansprüche vermuten. Doch um ausreichende wirtschaftliche Ertragsleistungen zu erbringen, benötigt sie geeignete Boden- und Klimaverhältnisse. Sauerkirschen entwickeln sich auf warmen, nährstoffreichen und lockeren Böden am besten. Schwere, nasse und schlecht durchlüftete Böden sind ungeeignet

und führen zu unzureichenden Erträgen und Fruchtqualitäten. Auch die Anfälligkeit für Krankheiten und nichtparasitäre Schäden zeigt sich deutlich erhöht. Der Ertragsanbau von Sauerkirschen wird vor allem in den kühleren Regionen der gemäßigten Klimazonen betrieben. Ungünstige Klimabedingungen für den Sauerkirschanbau sind lange, heiße und trockene Sommer, sowie sehr milde Winter. Um einen regelmäßigen Austrieb der Knospen zu gewährleisten muss im Winter ein bestimmtes Kältebedürfnis erfüllt sein, welches im Vergleich zu anderen Steinobstarten bei der Sauerkirsche relativ hoch ist. Wird dieses Kältebedürfnis nicht erfüllt, hat dies negative Folgen für die Blüte.

Die höchsten Ertragsverluste werden durch das Auftreten von Spätfrostschäden verzeichnet. Im Winter können Sauerkirschgehölze Temperaturen von bis ca. -20 °C ausgesetzt werden ohne Schäden davonzutragen (Dennis und Howell 1974). Umso weiter die Gehölze mit ihrer Entwicklung im Frühjahr voranschreiten, desto sensibler werden sie gegenüber kalten Temperaturen. Während der Blüte können wenige Grad Celsius unter dem Nullpunkt zu einem kompletten Ausfall der Ernte führen.

Innerhalb der sehr formreichen Art der Sauerkirschen kommen sowohl selbstfruchtbare als auch selbststerile Sorten vor. Die meisten für den Intensivanbau wichtigen Sorten gehören der ersten Gruppe an, sodass das Ertragsrisiko deutlich niedriger als bei anderen Fruchtarten ist. Obwohl Windbestäubung bis zu einem gewissen Umfang möglich ist, können hohe Erträge kaum ohne Mithilfe von Insekten erreicht werden. Die Flugintensität der Insekten und die damit verbundene Bestäubung von Obstgehölzen ist stark von den Witterungsverhältnissen während der Blüte abhängig. Beispielsweise kann bei vielen Niederschlagstagen und kalten Temperaturen während der Blüte ein geringerer Fruchtansatz erwartet werden.

Die meteorologischen Verhältnisse während des Fruchtwachstums beeinflussen das Ertragsniveau und die Fruchtqualität. In dieser Phase beeinträchtigen Temperaturen über 30 °C die physiologischen Prozesse der Gehölze und führen zu verminderter Photosyntheserate, reduziertem Wachstum und höherer Transpiration, was zu geringer Fruchtgröße führen kann. Außerdem ist die Witterung nach der Ernte ausschlaggebend für die Differenzierung der Blütenknospen für das Folgejahr. Zu hohe Temperaturen und geringer Niederschlag wirken sich negativ auf die Differenzierung aus (Flore und Layne 1999, Koumanov 2002).

Daraus wird ersichtlich, dass das Klima einer der wichtigsten Produktionsfaktoren im Sauerkirschanbau darstellt. Durch eine Vielzahl von Studien wurde bewiesen, dass sich das Klima in den letzten Jahrzehnten stark verändert hat. Dies kann die Ertragsleistung von

Obstanlagen beeinflussen. Aus dem fünften Sachstandbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) geht hervor dass die globale Lufttemperatur im Zeitraum 1880-2012 um 0.85 K zugenommen hat (IPCC 2013). Diese Zunahme ist aber durch räumliche und saisonale Unterschiede geprägt. Ein größerer Temperaturanstieg wurde auf der nördlichen Hemisphäre und in höheren Breitengraden beobachtet (IPCC 2013). Außerdem ist die Erwärmung im Winter und Frühjahr stärker als in den anderen Jahreszeiten (Schwartz et al. 2006). Klimaprojektionen weisen auf einen globalen Temperaturanstieg zwischen 1.5 °C und 4.5 °C bis 2100 hin (IPCC 2013). Durch die globale Erwärmung könnten extreme Wetterereignisse zunehmen. Möglicherweise erhöht sich die Häufigkeit und Intensität von Hitzeperioden. Bis zum Ende des Jahrhunderts wird es in Mitteleuropa wahrscheinlich die gleiche Anzahl von Tagen mit Temperaturen über 30 °C geben, als derzeit in Südeuropa (Beniston et al. 2007). Im Frühjahr und Sommer könnte die Anzahl von Niederschlagstagen in Mittel- und Osteuropa abnehmen, doch die Intensität der Niederschläge zunehmen (Giorgi et al. 2004).

3 Stand der Forschung

In den letzten Jahren beschäftigen sich immer mehr Studien mit den Auswirkungen des Klimawandels auf den Obstbau. In dem BMBF-Verbundprojekt „Klimawandel und Obstbau in Deutschland (KliO)“ wurden erstmals an der Humboldt-Universität zu Berlin die Auswirkungen des Klimawandels auf den Apfelanbau in Deutschland untersucht (Henniges et al. 2007, Chmielewski et al. 2008a, 2008b, 2009a, 2009b). Dabei zeigte sich, dass bis zum Ende dieses Jahrhunderts die Apfelbäume im Sommerhalbjahr mehr Wasser benötigen, und dass die Blüte und besonders die Fruchtreife der Bäume künftig zeitiger einsetzen wird, so dass sich der Zeitraum für die Fruchtentwicklung verkürzt. Dies führt u.a. zu geringeren Apfelträgen für heute etablierte Sorten. Die frühere Apfelblüte erhöht die Spätfrostgefahr mit jedoch nur leichten Schäden am Apfelsertrag. Die deutlich steigenden Temperaturen im Herbst und im Winter können gegen Ende dieses Jahrhunderts zu einem abnehmenden Kältereiz für die Gehölze führen. Zudem bieten die höheren Temperaturen dem Apfelwickler bessere Entwicklungsbedingungen, sodass sich im Jahresverlauf mehr als eine Generation dieses Schädling ausgebildet kann. Der Klimawandel könnte somit dem deutschen Apfelanbau zum Ende dieses Jahrhunderts einen jährlichen Schaden von über 40 Millionen Euro zufügen, wenn die Anpassung nicht über die heute üblichen Maßnahmen wie Bewässerung und Schädlingsbekämpfung hinausgeht. Zusätzliche Anpassungsmaßnahmen wie Frostschutz und erweiterte Schädlingsbekämpfung können dabei die prognostizierten Apfelschäden von über

10 % in einigen Obstbauregionen auf unter 5 % reduzieren. Eine weitere Begrenzung klimabedingter Schäden kann vermutlich durch einen Sortenwechsel erfolgen. Die Untersuchungen haben in erster Linie gezeigt, dass Anpassung an den Klimawandel rentabel ist und dazu beiträgt, Kosten einzusparen.

Mit dem Projekt CLIMAGRI (<http://climagri.entecra.it>, zuletzt abgerufen am 24. Juli 2014) wurden die Auswirkungen von Klimaänderungen auf die italienische Landwirtschaft beschrieben und die zu treffenden Anpassungsmaßnahmen herausgearbeitet. Im Rahmen des Projektes wurde gezeigt dass die Frostschäden in Obstanlagen nicht zurückgegangen sind, auch wenn mehrere regionale und nationale Studien einen Anstieg der Lufttemperaturen nachgewiesen haben (Brunetti et al. 2000, Tomozeiu et al. 2003, Matzneller et al. 2010). Für die Region Emilia-Romagna ergab sich, dass der frühere Vegetationsbeginn mit zunehmenden Kälteeinbrüchen im Frühjahr einher geht und damit zu einem höheren Ertragsrisiko führen kann.

Der Aufgabenschwerpunkt im Forschungsprojekt CHARIKO (http://www.agrar.hu-berlin.de/agrarmet/forschung/fp/CHARIKO_html, zuletzt abgerufen am 24. Juli 2014) lag in der Abschätzung der Kosten des Klimawandels für den Obst- und Weinbau in Hessen unter Berücksichtigung der möglichen Unsicherheiten von Klimamodellrechnungen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass im Laufe dieses Jahrhunderts mit einer signifikanten Verfrühung des Blühbeginns und der Pflückreife verschiedener Obstgehölze (Apfel, Birne, Süß-, Sauerkirsche, Pflaume, Pfirsich, Erdbeere, Wein) zu rechnen ist. Die Temperaturänderungen von fünf betrachteten regionalen Klimamodellläufen waren hingegen nicht groß genug, um statistisch signifikante Aussagen über die Veränderung von Dormanzschäden zu machen. Die Wahrscheinlichkeit für Spätfrostschäden wird sich bis 2100 voraussichtlich nicht ändern. Die durchgeführten Berechnungen zum Obstertrag ergaben, dass unter Berücksichtigung der CO₂-Düngung und mit zusätzlichen Beregnungsmaßnahmen der Ertrag bei allen untersuchten Fruchtarten um ca. 18 % bis 54 % zunehmen kann. Infolge der hohen Ertragszuwächse können Obstbauern in Zukunft mehr Gewinn erwarten, doch sind gerade diese Rechnungen als sehr unsicher einzustufen.

Im Rahmen des Pileus-Projekt (www.pileus.msu.edu, zuletzt abgerufen am 24. Juli 2014) der Michigan State University wurde ein Entscheidungsinstrument (Decision Support System) für den Sauerkirschanbau in der Region Michigan entwickelt. Es steht den Produzenten im Internet zur Verfügung und bietet die Möglichkeit, die vergangen Klimavariationen und die

möglichen künftigen Auswirkungen des Klimawandels auf den Ertrag und das Einkommen der Produzenten abzuschätzen (Zavalloni et al. 2008).

Diese Arbeit ist im Zusammenhang mit dem CLIMARK-Projekt entstanden (<http://cherry.cse.msu.edu>, zuletzt abgerufen am 24. Juli 2014) an dem 12 Forschungseinrichtungen und Universitäten aus sechs Ländern beteiligt sind. Das Hauptziel des Projektes ist die Entwicklung, Implementierung und Evaluierung eines integrierten Konzepts zur Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf internationale Marktsysteme. Diese Untersuchungen gehen weit über die traditionelle, regionale Klimawirkungsforschung hinaus. Sie berücksichtigen Industrien mit mehreren Produktionsstandorten im globalen Maßstab. Als Beispiel wird in dem Vorhaben die Sauerkirschproduktion mit Standorten in Europa und Nordamerika betrachtet.

4 Zielstellung

Der Obstbau wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Manche Maßnahmen, wie Düngung, Schädlings- und Krankheitsbekämpfung können kurzfristig direkt vom Produzenten vorgenommen werden. Bei der Wahl der Sorte, der Installation von Bewässerungssystemen und der Standortwahl handelt es sich hingegen um längerfristige Investitionen. Das Klima ist ein Produktionsfaktor der nur begrenzt beeinflusst werden kann, aber in längerfristige Planungen von Produzenten mit einfließen soll.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Veränderungen der agrarklimatologischen Bedingungen im Zuge des Klimawandels für ausgesuchte Sauerkirschanbauregionen in Europa und Nordamerika untersucht. Die Arbeit soll auf veränderte Risiken (Spätfrost, Hitzewellen, Wassermangel) hinweisen, die durch nachhaltige, praxisorientierte und ökonomisch vertretbare Anpassungsmaßnahmen (Überdachung, Frostschutzberegnung, Bewässerung, Anbausystem, Wahl der Sorte und Unterlage, etc.) begrenzt werden können. Der Klimawandel kann neben Risiken aber auch Chancen für den Sauerkirschanbau eröffnen. Höhere Temperaturen und eine längere Vegetationsperiode können regional differenziert zu günstigeren Anbaubedingungen führen.

Ein besonderer Schwerpunkt wurde auf die Entwicklung phänologischer Modelle gelegt, mit denen Veränderungen im Entwicklungsrhythmus der Sauerkirschgehölze analysiert werden konnten. Dadurch war es möglich entwicklungsspezifische Zeiträume abzugrenzen, in denen

sich die agrarklimatologischen Bedingungen so ändern, dass die Gehölze Stress- oder Extremsituationen (z.B. Spätfrost) ausgesetzt sind.

5 Daten und Methoden

5.1 Charakterisierung der Standortbedingungen in den Anbauregionen

5.1.1 Rheinland-Pfalz

Mit einem Anteil von 24 % der gesamtdeutschen Sauerkirschanbaufläche und einer Produktion von 9 458 t in 2007 nimmt Rheinland-Pfalz bundesweit die erste Stelle in der Erzeugung von Sauerkirschen ein (Goldbach 2011). Der Anbau ist hierbei mit 162 ha im Großraum Koblenz (50.35° N, 7.58° E; 65 m ü.d.M.) und mit 576 ha im Großraum Mainz (49.98° N, 8.27° E; 88 m ü.d.M.) konzentriert. Zusammen umfassen beide Gebiete 92 % der Anbaufläche von Rheinland-Pfalz (SLRF 2010).

Das von Worms über Mainz bis nach Bingen gebildete Dreieck wird als Rheinhessen bezeichnet. Geschützt von Hunsrück und Taunus aus nördlicher Richtung und Odenwald aus östlicher Richtung ergibt sich für den Sauerkirschanbau ein günstiges Klima. Das Anbaugebiet um Koblenz ist von den Bergen der Vulkaneifel, vom vorderen Hunsrück und vom unteren Westerwald begrenzt. Das Klima ist aufgrund dieser topografischen Gegebenheiten als gemäßigt einzustufen. Im Zeitraum 1971-2000 ist die mittlere jährliche Lufttemperatur 9.6 °C und der jährliche Gesamtniederschlag beträgt 720 mm (Abb. 1). Die mittleren minimalen Lufttemperaturen sind mit -1.0 °C im Januar und -0.9 °C im Februar knapp im Minusbereich. Die wärmsten Monate sind Juni, Juli und August mit mittleren maximalen Temperaturen über 20 °C. Der Niederschlag ist ziemlich ausgeglichen über das Jahr verteilt, doch fällt der meiste Niederschlag im Sommer, während Januar, Februar, März und April die niederschlagsärmsten Monate sind.

Das Gebiet um Koblenz ist durch vulkanische Böden, vorwiegend Bimsschichten geprägt, aber auch Lössinseln und Lehmböden sind zu finden. Die Böden der Niederungen von Rheinhessen sind neben schmalen Schwemmlandablagerungen überwiegend leichte, meist kalkhaltige Sande bis in Hanglagen und dann wechselhaft von kiesig bis zu Ton- und Kalkmergeln, während auf dem Plateau Lößböden wechselnder Mächtigkeit vorherrschen (<http://obstbau.rlp.de>, zuletzt abgerufen am 24. Juli 2014).

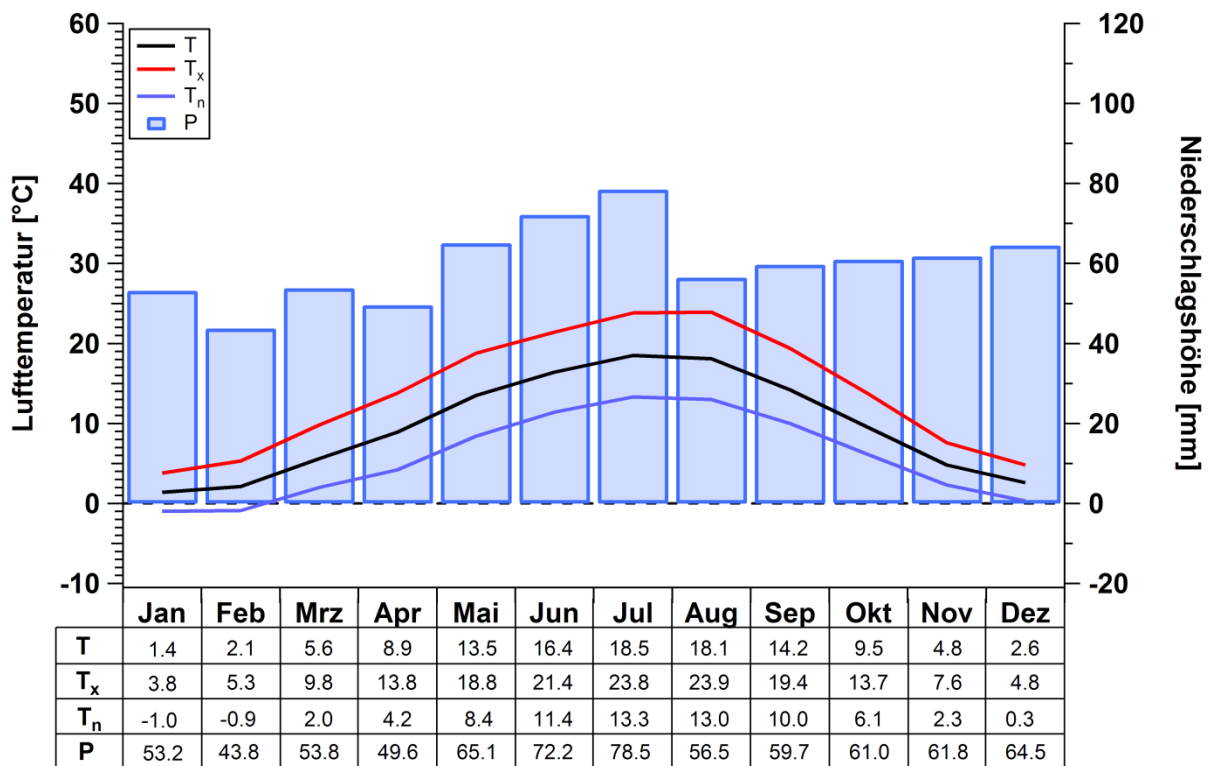


Abb. 1: Klimadiagramm der Sauerkirschanbaugebiete in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 (T = mittlere Lufttemperatur, T_x = mittlere maximale Lufttemperatur, T_n = mittlere minimale Lufttemperatur, P = Niederschlagshöhe).

5.1.2 Przybroda

In der Anbauregion Wielkopolskie wurde im Jahr 2010 eine Fläche von 2 940 ha mit Sauerkirschen bewirtschaftet, die 9 % der gesamten Anbaufläche von Polen ausmacht. Mit 6 797 t wurden hier 2010 aber nur 5 % der gesamtstaatlichen Produktion angebaut (CSO 2012).

Przybroda (52.52° N, 16.65° E; 82 m ü.d.M.) liegt ca. 25 km nordwestlich der Landeshauptstadt Poznan. Es herrscht ein relativ mildes Klima da dieser Standort noch von atlantischen Luftströmen profitiert. Je weiter man sich in der Region nach Osten begibt, desto mehr kontinentale Einflüsse werden ersichtlich. Die Jahresmitteltemperatur in Przybroda lag im Zeitraum 1985-2010 bei 9.1 °C und die mittlere Niederschlagshöhe betrug 525 mm (Abb. 2). Im Vergleich zu den Anbaugebieten in Rheinland-Pfalz sind die Winter hier kälter ($T = -0.2$ °C) und die Sommer wärmer ($T = 18.6$ °C). Langjährige Mittelwerte der minimalen Lufttemperatur unter 0 °C wurden in den Monaten Dezember bis März beobachtet. Mit einer mittleren maximalen Temperatur von 24.7 °C ist der Juli der wärmste Monat in der Region. Hier fallen im Jahresmittel ca. 25 % weniger Niederschläge als in Rheinland-Pfalz. Der

niederschlagsreichste Zeitraum ist der Sommer, während in den Monaten von Oktober bis April eine Niederschlagshöhe von 40 mm pro Monat nicht überschritten wird.

Das Relief in der Region Wielkopolskie wurde vorwiegend durch die Eiszeiten geformt. Die am meisten vertretenen Böden sind Podsol (60 %), sowie Lehm- und Braunböden (20 %), die restlichen Flächen werden von Feuchtwiesen gebildet. Durch die geringen Niederschläge und einer hohen Evaporation während der Vegetationsperiode trocknen die Böden leicht aus (AR 2007).

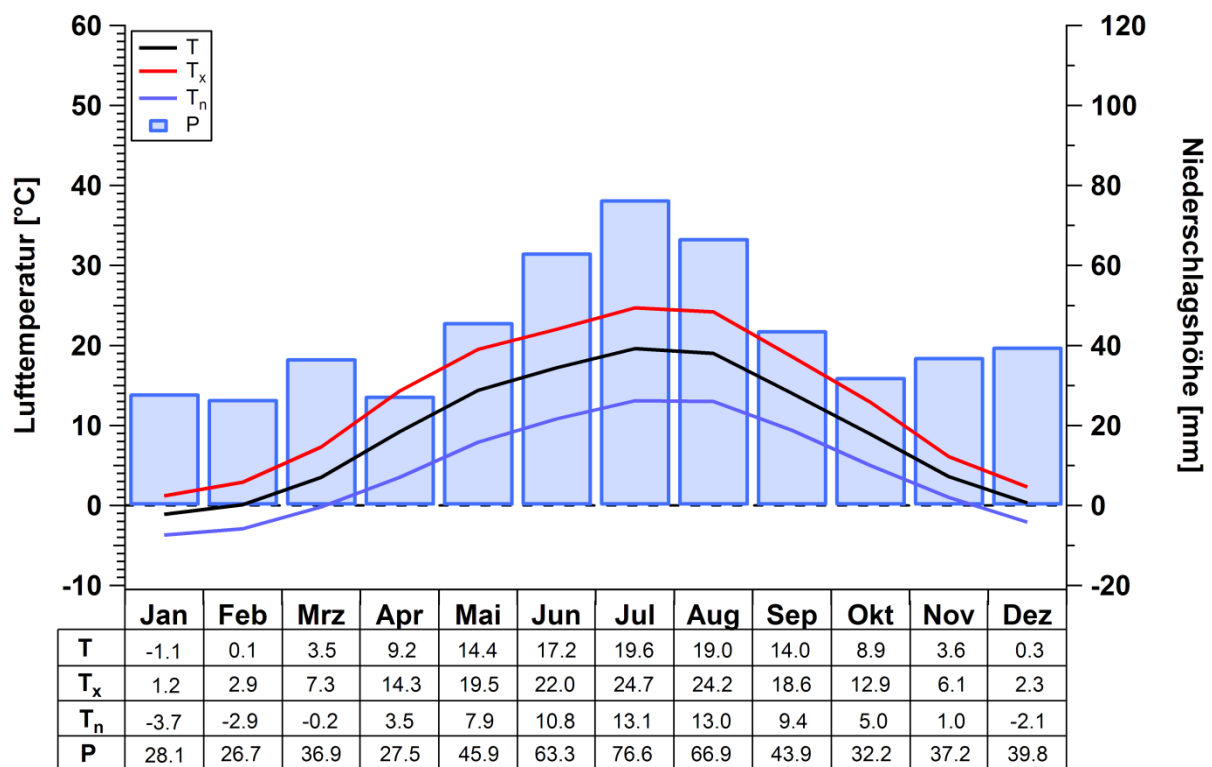


Abb. 2: Klimadiagramm der Sauerkirschanbaugebiete in Przybroda im Zeitraum 1985-2010 (T = mittlere Lufttemperatur, T_x = mittlere maximale Lufttemperatur, T_n = mittlere minimale Lufttemperatur, P = Niederschlagshöhe).

5.1.3 Maple City

Maple City (44.86° N, 85.84° W; 244 m ü.d.M.) liegt im Landkreis Leelanau in der nord-westlichen Region von Michigan. Zusammen mit den Lankreisen Emmet, Charevoix, Chenoygan, Antrim, Gran Traverse, Benzie und Manistee ist es die größte Sauerkirschanbauregion in Michigan. In 2007 wurden hier 57 500 t (60 % der Produktion von Michigan) Sauerkirschen auf einer Fläche von 8 858 ha (58 % der Anbauläche des Staates) geerntet (DARD 2011, USDA 2009).

Die Anbauregion ist eine Hügellandschaft die sich entlang des Michigansees erstreckt. Im landesinneren reicht sie fast bis zu den Grayling Fingers, die größten Erhebungen der unteren Halbinsel. Die Region wird stark vom Michigansee geprägt, welcher für eine erhöhte Wolkenbildung und einem starken Schneefall im Herbst und Winter verantwortlich ist. Ausserdem beeinflusst der See auch die Lufttemperaturen, die im Frühling kühl sind, im Herbst aber länger warm bleiben. Das Klima wird als kontinental eingestuft, mit warmen aber kurzen Sommern und langen kalten bis sehr kalten Wintern. Im Zeitraum 1971-2000 betrug die Jahresmitteltemperatur 7.7 °C und die mittlere Niederschlagshöhe lag bei 880 mm (Abb. 3). Im Vergleich zu den europäischen Anbaugebieten ist es hier im März ($T = -0.5$ °C) und April ($T = 6.1$ °C) deutlich kälter. Die minimalen Lufttemperaturen liegen in den Monaten November bis April unter dem Nullpunkt, während im Sommer die mittlere maximale Temperatur die 25 °C Grenze überschreitet. In allen Monaten fallen mehr Niederschläge als in den europäischen Anbaugebieten, wobei der Spätsommer und Herbst der niederschlagsreichste Zeitraum ist.

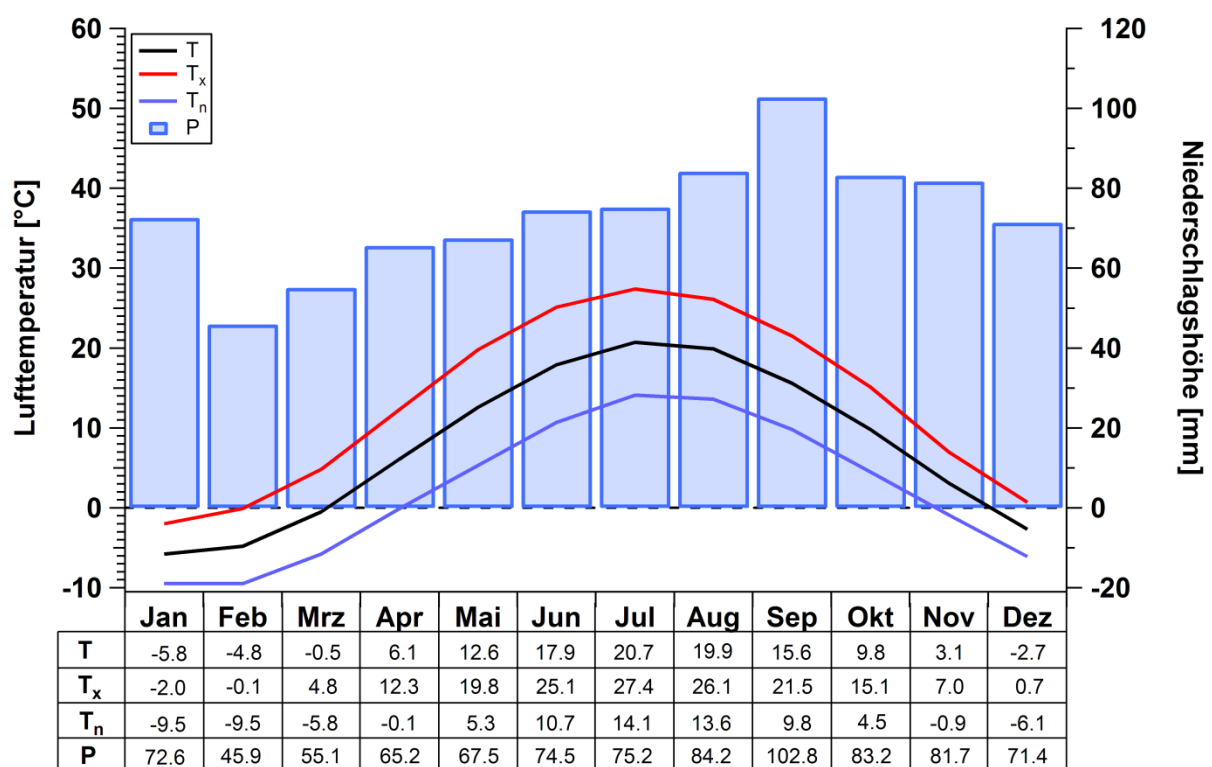


Abb. 3: Klimadiagramm der Sauerkirschanbauggebiete in Maple City im Zeitraum 1971-2000 (T = mittlere Lufttemperatur, T_x = mittlere maximale Lufttemperatur, T_n = mittlere minimale Lufttemperatur, P = Niederschlagshöhe).

Die typischen Böden der nördlichen Regionen Michigans sind Spodosols (klassifiziert als Kalkaska-Sand), die vorwiegend mit Zuckerahorn und Gelbbirke bestanden sind, aber auch mit Erdbeeren und Kartoffeln bewirtschaftet werden. Sauerkirschen werden in Hanglagen angebaut, um das Spätfrostisiko zu verringern. Die Böden sind gering bis mäßig fruchtbar, gut entwässert, sandig-lehmig oder lehmig-sandig (Edson et al. 1998).

5.1.4 Hart

In der Umgebung von Hart (43.68° N, 86.42° W; 235 m ü.d.M), welches sich in der Region West Michigan befindet, belief sich die Produktion von Sauerkirschen in 2007 auf 24 500 t, was 24 % der gesamten Erzeugung von Michigan ausmacht. In den Landeskreisen Mason, Oceana, Muskegon, Ottawa, Newaygo, Kent, Montcalm, Ionia und Mecosta waren 4 726 ha (31 % vom staatlichen Anbau) dem Sauerkirschanbau gewidmet (DARD 2011, USDA 2009).

Diese Sauerkirschanbauregion befindet sich in den Lake Michigan Lowlands, einer sanft geschwungenen Hügellandschaft mit Höhen von 180 bis 240 m ü.d.M. Der Einfluss von Lake Michigan und die vorwiegenden Westwinde prägen das Klima. Die Region hat ein kontinentales feuchtes Klima, mit warmen niederschlagsreichen Sommern und kalten schneereichen Wintern. Die durchschnittliche Jahrestemperatur in Hart beträgt 7.9 °C und die mittlere jährliche Niederschlagsmenge ist 911 mm (Abb. 4). Die Temperaturverhältnisse können mit denen von Maple City verglichen werden, jedoch sind die Temperaturamplituden hier etwas geringer. Besonders im Frühjahr werden höhere minimale Lufttemperaturen verzeichnet. Die mittlere Niederschlagshöhe in den Monaten März bis August beträgt 464 mm und ist somit 42 mm höher als in Maple City, während hier im Winter 15 mm weniger Niederschlag fallen.

Die Böden in der Region West Michigan, sowie ein Großteil der Böden der unteren Halbinsel von Michigan, sind aus Moränenablagerungen der letzten Eiszeit entstanden. Das Gebiet stellt eine Übergangszone zwischen den überwiegenden Spodosols im Nordwesten und den vorwiegenden Alfisols im Südwesten der Halbinsel dar. Sauerkirschen werden in der hügeligen Landschaft mit gut entwässerten, sandig-lehmigen oder lehmig-sandigen Böden angebaut.

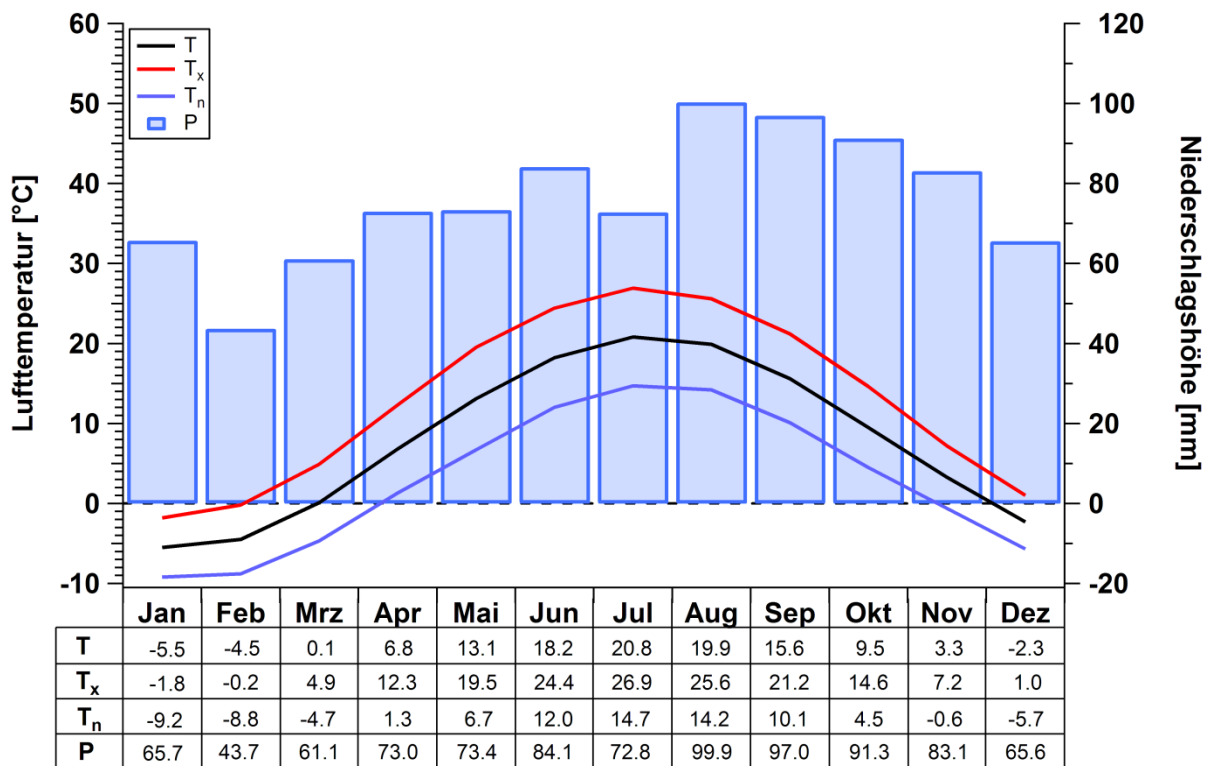


Abb. 4: Klimadiagramm der Sauerkirschanbauggebiete in Hart im Zeitraum 1971-2000 (T = mittlere Lufttemperatur, T_x = mittlere maximale Lufttemperatur, T_n = mittlere minimale Lufttemperatur, P = Niederschlagshöhe).

5.1.5 Eau Claire

Das süd-westlichste Sauerkirschanbauggebiet Michigans umfasst die Landkreise Berrien, Van Burren, Cass, Kalamanzoo und Allegan. In 2007 wurden hier 11 793 t Sauerkerchen produziert. Der mittlere Hektarertrag belief sich auf 7.4 t und war somit 0.95 t/ha höher als in Maple City und 2.26 t/ha höher als in Hart. Dies weist auf bessere Anbaubedingungen, aber auch auf eine intensivere Bewirtschaftung der Sauerkerchplantagen hin (DARD 2011, USDA 2009).

Die Region zeichnet sich für ihre weiten Ebenen und sanft geschwungenen Hügellandschaften aus, in denen sich die wichtigsten Obstanbauggebiete des Landes befinden. Das mildere Klima erlaubt es, anspruchsvollere Fruchtarten als in den nördlicheren Regionen anzubauen. Die Jahresmitteltemperatur in Eau Claire (42.01° N, 86.24° W; 265 m ü.d.M) ist mit 9.9 °C deutlich höher als im Norden Michigans (Abb. 5). Im Vergleich zu den europäischen Anbaugebieten sind die Winter jedoch kälter (T = -2.9 °C) und die Sommer wärmer (T = 21.8 °C). Eau Claire ist das Niederschlagsreichste der untersuchten Anbauggebiete (P = 927 mm). Die

jährliche Niederschlagsverteilung zeigt ein sommerliches Maximum und ein winterliches Minimum.

Der Südwesten von Michigan wird weitgehend durch Alfisoils bestimmt. Vorwiegenden kommen trockene oder feuchte Ton und Lehmböden, aber auch Sandböden in der Nähe vom Michigansee und in den Hügellandschaften vor. Besonders gute Bedingungen zum Anbau von Sauerkirschen werden in den gut entwässerten Sand- und Lehmböden in leichten Hanglagen vorgefunden.

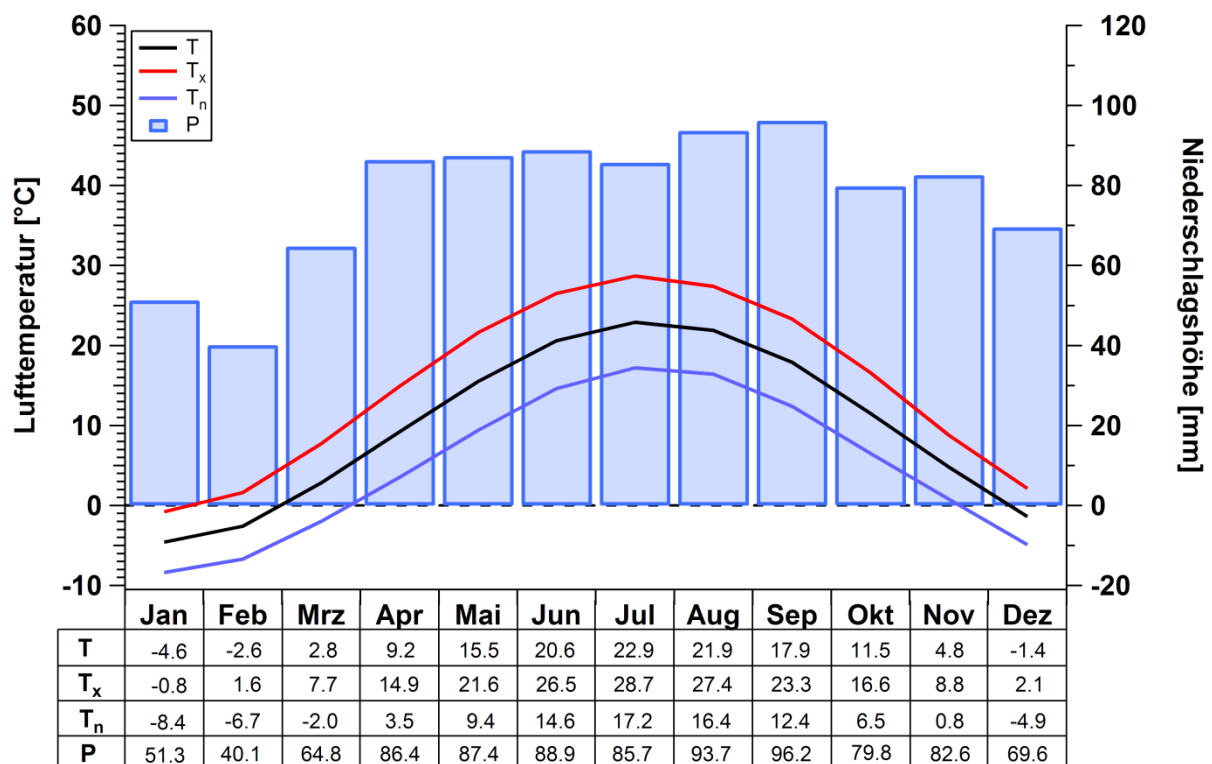


Abb. 5: Klimadiagramm der Sauerkirschanbaugebiete in Eau Claire im Zeitraum 1971-2000 (T = mittlere Lufttemperatur, T_x = mittlere maximale Lufttemperatur, T_n = mittlere minimale Lufttemperatur, P = Niederschlagshöhe).

5.2 Daten

5.2.1 Phänologische Daten

Um Veränderungen in den Entwicklungsphasen der Sauerkirschen zu untersuchen, sowie zur Optimierung und Validierung phänologischer Modelle wurden für die deutsche Anbauregion Beobachtungen (*Prunus cerasus*, Sorte: „Schattenmorelle“) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) im Zeitraum 1962-2009 verwendet. Es wurden die phänologischen Stadien Blühbeginn und Blühende benutzt. Der Blühbeginn ist der Zeitpunkt an dem an einigen (etwa

drei) Stellen des beobachteten Baums die ersten normalen Blüten geöffnet und die Staubgefäße zwischen den Blütenblättern sichtbar sind (BBCH 60; Meier 1997). Das Blühende ist als Zeitpunkt definiert an dem etwa 95 % aller Blüten abgeblüht sind, d.h. ihre Blütenblätter verloren haben (BBCH 69). Die phänologischen Beobachtungen des DWD wurden mit Universal-Kriging 2. Ordnung (mit impliziter Höhenregression und gleitendem Suchradius; Blümel und Chmielewski 2013, Wackernagel 1998) auf ein Raster mit einer 0.2° Auflösung (14 km x 22 km) interpoliert. Die Anbauregionen in Rheinland-Pfalz konnten somit in insgesamt vier Gitterpunkte eingeteilt werden. Das Gebiet um Koblenz umfasst zwei Gitterpunkte mit den Koordinaten 50.4° N / 7.4° E (193 m ü.d.M.) und 50.4° N / 7.6° E (233 m ü.d.M.). Für den Großraum Mainz sind die Koordinaten der verwendeten Gitterpunkte 50.0° N / 8.0° E und 50.0° N / 8.2° E, mit einer mittleren Höhe von 200 m und 150 m ü.d.M.

Für die Untersuchungen zur Entwicklung der Sauerkirschgehölze und zur Validierung der in Rheinland-Pfalz entwickelten Modelle zur Vorhersage des Blühbeginns wurden Stationsdaten aus den polnischen und nordamerikanischen Anbaugebieten des CLIMARK-Projekts verwendet. Dafür standen für jede Versuchsstation phänologische Beobachtungen des Blühbeginns (BBCH 60) für unterschiedliche Zeiträume zur Verfügung (Tab. 1).

Tab. 1: Geografische Lage und Beobachtungszeitraum des Blühbeginns von Sauerkirschgehölzen der Stationen des CLIMARK-Projekts.

Station	Breite [°]	Länge [°]	Höhe [m]	Zeitraum	Sorte
Przybroda (POL)	52.52 N	16.65 E	80	1986-2010	English Morello
Eau Claire (USA)	42.01 N	86.24 W	265	1992-2000	Montmorency
Hart (USA)	43.68 N	86.42 W	235	1986-2000	Montmorency
Maple City (USA)	44.86 N	85.84 W	244	1982-2000	Montmorency

Zusätzlich wurden die in der deutschen Anbauregion entwickelten Modelle zur Vorhersage des Blühbeginns an Beobachtungen der phänologischen Gärten des „Global Phenological Monitoring Programme“-Projekts (GPM) validiert. Im Rahmen des GPM-Projekts sind eine Vielzahl von standardisierten phänologischen Gärten in Deutschland und Europa, sowie einer in Milwaukee (USA) entstanden (Chmielewski et al. 2012a). Die beobachtete Sauerkirschsorte (*Prunus cerasus*) im GPM-Netzwerk ist „Vladimirskaia“ (<http://gpm.hu-berlin.de>, zuletzt abgerufen am 24. Juli 2014). Zur Validierung standen je Station zwischen vier und neun Beobachtungsjahre zur Verfügung (Tab. 2).

Tab. 2: Geografische Lage und Beobachtungszeitraum der Lufttemperatur und des Blühbeginns von Sauerkirschgehölzen der Stationen des Global Phenological Monitoring Programme (GPM).

Station	Breite [°]	Länge [°]	Höhe [m]	Zeitraum
Braunschweig (DEU)	52.28 N	10.45 E	81	2005-2011
Dahlem (DEU)	52.46 N	13.30 E	51	2007-2011
Geisenheim (DEU)	49.98 N	7.97 E	118	2004-2010
Offenbach (DEU)	50.10 N	8.78 E	99	2007, 2009-2011
Schleswig (DEU)	54.53 N	9.55 E	43	2002-2003, 2005-2010
Tharandt (DEU)	50.98 N	13.53 E	365	2004-2010
Linden (DEU)	50.53 N	8.68 E	172	2004-2011
Graupa (DEU)	51.00 N	13.93 E	180	2005, 2007-2010
Praha (CZE)	50.13 N	14.37 E	284	2006-2011
Banska Bystrica (SVK)	48.73 N	19.12 E	427	2003-2010
Milwaukee (USA)	43.38 N	88.02 W	265	2002-2010

5.2.2 Klimadaten

5.2.2.1 Beobachtungen

Zur Bestimmung der Anbaubedingungen in den untersuchten Regionen wurden tägliche minimale, maximale und mittlere Lufttemperaturen, sowie die tägliche Niederschlagshöhe verwendet. In Rheinland-Pfalz umfasst der Datensatz Beobachtungswerte des DWD im Zeitraum 1961-2009. Ebenso wie die phänologischen Beobachtungen, wurden auch die meteorologischen Stationsdaten durch Universal-Kriging 2. Ordnung in Gitterpunkte mit einer Auflösung von 0.2° gerastert. Zur Analyse der restlichen Anbauregionen dienten Stationsdaten für den Zeitraum 1971-2000 in Michigan und 1985-2010 in Przybroda. Bei den meteorologischen Beobachtungen der Vereinigten Staaten fehlte die Tagesmitteltemperatur, deshalb wurde diese aus dem Mittel von täglicher maximaler und minimaler Lufttemperatur berechnet.

Um die in Rheinland-Pfalz entwickelten Modelle zur Vorhersage des Blühbeginns zu validieren, wurden Lufttemperaturen (tägliche minimale, maximale und mittlere) der Wetterstationen des GPM-Projekts für unterschiedliche Zeiträume verwendet (Tab. 2). Die Wetterstationen befinden sich in unmittelbarer Nähe der standardisierten phänologischen Gärten.

Für die Chilling-Modelle, sowie zur Analyse der Temperaturverhältnisse während der Blütezeit wurden Temperaturen in stündlicher Auflösung (T_{ih}) benötigt. Diese wurden mit der Methode von Linvill et al. (1990) als Funktion des Sonnenauf- und Sonnenuntergangs über einen Sinus-Log Ansatz aus der Tagesminimum- und Tagesmaximumtemperatur berechnet:

$$T_{ih} = (T_{xi} - T_{ni}) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot t_a}{DL_i + 4}\right) + T_{ni} \quad (1)$$

T_{xi} und T_{ni} sind hier die Maximum- und Minimumtemperatur am Tag i , DL_i ist die Tageslänge in Stunden (von Sonnenaufgang bis -untergang) und t_a ist die Zeit in Stunden (≥ 0), gezählt ab dem Sonnenaufgang. Die Formel wird für die Zeiten zwischen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang verwendet. Für die Zeit zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang verwendet man

$$T_{ih} = T_{ss} - \frac{T_{ss} - T_{ni+1}}{\ln(24 - DL_i)} \cdot \ln(t_b) \quad (2)$$

T_{ss} ist die Temperatur zum Sonnenuntergang, wie sie aus Gleichung (1) bestimmt wurde, und T_{ni+1} ist die Minimumtemperatur des Folgetages $i+1$. Die Zeit t_b gibt die Zeit in Stunden nach dem Sonnenuntergang plus 1 h (eine Stunde) an ($t_b \geq 1$).

5.2.2.2 Klimaszenarien

Für die Beurteilung der künftigen Anbaubedingungen, Veränderungen in der Phänologie und der Abschätzung von Frostschäden wurden meteorologische Daten von regionalen Klimamodellen (RCM) verwendet. In Rheinland-Pfalz bestand der Datensatz aus täglichen Temperaturen (minimale, maximale und mittlere) und der täglichen Niederschlagshöhe von drei dynamischen RCM, sowie zwei Läufen des statistischen regionalen Klimamodells WETTREG2010 (Tab. 3). Als Emissionsszenario wurde SRES-Szenario A1B benutzt (IPCC 2007). Die Daten der dynamischen RCM lagen als Gitterpunkte mit einer Auflösung von 0.2° vor, während der WETTREG2010 Datensatz auf Stationsdaten basiert und ebenfalls gerastert wurde. Die Klimaszenarien umfassen die Zeiträume 2011-2040 (P1), 2041-2070 (P2) und 2071-2100 (P3), sowie den Kontrolllauf 1971-2000 (C20). Die langjährigen monatlichen Mittelwerte (1971-2000) der Modelldaten wurden mit den gerasterten Messwerten korrigiert. Dieselben Korrekturfaktoren wurden auch in den künftigen Szenarien angewandt. Eine detaillierte Beschreibung dieser BIAS-Korrektur kann in Blümel und Chmielewski (2013) nachgelesen werden.

Für die Anbauregion in Polen standen tägliche Temperaturen (minimale, maximale und mittlere) und die tägliche Niederschlagshöhe von sechs RCM (SRES A1B) über den Zeitraum 1971-2100 zur Verfügung (Tab. 3). Die Auflösung der Rasterdaten betrug 0.25° und sämtliche Berechnungen wurden am Gitterpunkt mit den Koordinaten 52.63° N, 16.63° E durchgeführt. Eine Verminderung der systematischen Fehler der Modelldaten erfolgte durch Quantile Mapping.

In Michigan wurden Stationsdaten für die in Tabelle 1 angeführten Standorte im Zeitraum 2041-2070 (P2) und 1971-2000 (C20) verwendet. Die modellierten maximalen und minimalen Lufttemperaturen, sowie die Niederschlagshöhe von vier RCM (SRES A1B) wurden mithilfe von Quantile Mapping korrigiert (Abraham 2013).

Tab. 3: Übersicht über die verwendeten globalen und regionalen Klimamodelle.

Standort	Globales Klimamodell	Regionales Klimamodell
Reinland-Pfalz (DEU)	ECAM5	REMO-UBA
	ECAM5	CLM
	HadCM3	CLM
	ECAM5	WETTREG2010.0
	ECAM5	WETTREG2010.1
Przybroda (POL)	ARPAGE	DMI-HIRAM5
	BCM	DMI-HIRAM5
	ECAM5	KNMI-RACMO2
	HadCM3	METO-HC
	ECAM5	MPI-M-REMO
	BCM	SMHIRCA
Michigan (USA)	CCSM	CRCM
	CGCM3	CRCM
	CCSM	WRFG
	CGCM3	WRFG

5.3 Methode

5.3.1 Klimatische Indikatoren

5.3.1.1 Bivariate Häufigkeitsverteilung von Lufttemperatur und Niederschlagshöhe

Die Interaktion zwischen Temperatur und Niederschlag spielt eine wichtige Rolle in der Entwicklung und Ertragsbildung von Obstgehölzen. Aus diesem Grund wurden die mittlere Tagestemperatur und die tägliche Niederschlagshöhe durch eine bivariate Häufigkeitsverteilung dargestellt. Der Zeitraum von April bis Juli (122 Tage) wurde als mittlerer Entwicklungs- und Ertragsbildungszeitraum definiert. Für jedes Anbaugebiet standen tägliche Klimadaten von mehreren RCM zur Verfügung. Zunächst wurde der Mittelwert über die RCM gebildet, wobei für jedes Anbaugebiet 122 Werte der täglichen Lufttemperatur und 122 Werte der täglichen Niederschlagshöhe je untersuchten Entwicklungs- und Ertragsbildungszeitraum entstanden. Anschließend erfolgte die Klassenbildung in 1 °C Schritten der Lufttemperatur und in 1 mm Schritten der Niederschlagshöhe. Die absolute Häufigkeitsverteilung wurde anschließend in einem Konturdiagramm mittels Isolinien dargestellt.

5.3.1.2 Standardized Precipitation Index (*SPI*)

In der Literatur findet man eine Vielzahl von Indikatoren zur Charakterisierung von Trockenheit. Der Standardized Precipitation Index (*SPI*) wurde von McKee et al. (1993) entwickelt und zur Untersuchung von meteorologischen, landwirtschaftlichen und hydrologischen Trockenheits- und Feuchtigkeitsbedingungen angewandt. Zur Berechnung dieses Indices benötigt man ausschließlich die Niederschlagshöhe über einen festgelegten Zeitraum. Trockenheitsbedingungen in der Landwirtschaft wurden am besten mit einer Skala von 2 bis 3 Monaten dargestellt (Bussay et al. 1999). Eine signifikante Beziehung zwischen dem Grundwasserspiegel und dem *SPI* bestand bei einer zeitlichen Auflösung von 5 bis 24 Monaten (Szalai und Szinell 2000). In dieser Arbeit wurden die Monate von April bis Juli als mittlerer Entwicklungs- und Ertragsbildungszeitraum definiert und deswegen der *SPI* für diesen Zeitraum berechnet.

Der Zeitpunkt des Blattfalls im Spätsommer oder Herbst kann bei Sauerkirschen den Ertrag im nächsten Jahr beeinflussen (Zavalloni et al. 2008). Ein früher Blattfall, der durch Wassermangel verursacht werden kann, führt zu geringeren Einlagerungen von Kohlenhydraten in den Blättern (Flore und Howell 1987) und wurde mit einer Abnahme der Härte von Knospen

gegenüber kalten Temperaturen im Winter, sowie einem schwächerem Fruchtansatz im Folgejahr in Verbindung gebracht (Howell und Stackhouse 1973). Deswegen wurde der *SPI* auch für den Zeitraum von August bis September untersucht.

Zur Berechnung des *SPI* wurden die Niederschlagssummen (April-Juli, bzw. August-September) des untersuchten Zeitraums (1971-2000) mit einer kumulativen Gammaverteilung angepasst und dann in eine kumulative Standard-Normalverteilung umgewandelt. Hierdurch wird die Häufigkeit der Niederschlagssummen in eine Eintrittswahrscheinlichkeit transformiert. Der *SPI* ist somit eine für den Standort und den untersuchten Zeitraum normalisierte Größe, die in *SPI*-Klassen eingeteilt wird (Tab. 4). Eine detaillierte Beschreibung der Berechnungsmethode kann man in der Arbeit von Lloyd-Hughes und Saunders (2002) finden. Um Abschätzungen für künftige klimatische Bedingungen durchzuführen, wurde der relative Standardized Precipitation Index (*rSPI*) verwendet (Dubrovsky et al. 2009). Dabei besteht der erste Schritt in der Kalibrierung der Gammafunktion für einen bestimmten Zeitraum (1971-2000). Danach verwendet man diese Gammafunktion um die *SPI* für künftige Zeiträume (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) zu berechnen. Somit stehen die *SPI* der künftigen Zeitabschnitte in Beziehung zu den Niederschlagsbedingungen des Kalibrierungszeitraums.

Tab. 4: Trockenheits- und Feuchtigkeitsklassen des Standardized Precipitation Index (*SPI*).

<i>SPI</i>	Klassen
≥ 2.00	Extrem zu feucht
1.00 bis 1.99	Mäßig bis deutlich zu feucht
0.01 bis 0.99	Fast normal (etwas zu feucht)
-0.01 bis -0.99	Fast normal (etwas zu trocken)
-1.00 bis -1.99	Mäßig bis deutlich zu trocken
≤ -2.00	Extrem zu trocken

5.3.1.3 Trockenperioden

Um einen guten Sauerkirschertrag zu erzielen, darf die jährliche Niederschlagshöhe nicht unter 500-600 mm liegen (Hrotko 2003, Por 1982). Im Zeitraum zwischen dem Fruchtansatz und der Ernte besteht mit einer wöchentlichen Niederschlagshöhe von 10-15 mm eine ausgewogene Wasserversorgung für Kirschen (Szenteleki et al. 2010). In dieser Arbeit wurden Trockenperioden für die Monate April bis Juli untersucht. In einem ersten Schritt erfolgte die

Berechnung von Niederschlagstagen. Hierzu wurde angenommen dass bei einer täglichen Niederschlagshöhe unter 1 mm der Niederschlag direkt wieder verdunstet (Epifani et al. 2004, Douguedroit 1987, Lazaro et al. 2001, Tilya und Mhita 2007). Die Trockenperioden wurden dann über drei Zeitspannen bestimmt: TP_7 = mindestens 7 aufeinanderfolgende Tage ohne Niederschlagstag, sowie über 14 (TP_{14}) und 21 Tage (TP_{21}).

5.3.1.4 Hohe Temperaturen während des Fruchtwachstums und der Blütendifferenzierung der Knospen

Hohe Temperaturen ($> 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) während der Fruchtentwicklung können physiologische Prozesse, wie Photosynthese, Transpiration oder Nährstoffassimilation von Obstgehölzen beeinflussen (Flore und Layne 1999, Koumanov 2002). Die Kombination aus Hitze und Trockenheit führt zu einer partiellen Schließung der Stomata. Dies ist mit einer Abnahme der Transpirationsrate und einer geringeren Assimilation von Kohlendioxid der Gehölze verbunden. Bei Versuchen an Pflaumenbäumen wurde beobachtet, dass auch unter optimaler Wasserversorgung, eine Erhöhung von jedem Grad Celsius im Temperaturbereich von $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, zu einer ca. 10 % Reduktion der Kohlendioxidassimilation führte (Even-Chen et al. 1981).

Eine maximale Photosyntheserate wurde für Sauerkirschen bei $1000 - 1200\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ Lichtintensität, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ Blatttemperatur und hoher Luftfeuchtigkeit gefunden (Sams und Flore 1982). Temperaturen zwischen $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ führen zu einer Abnahme der Photosyntheserate. Steigen die Temperaturen hingegen über $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ können die Chloroplasten der Blätter irreversibel geschädigt werden (Haldimann und Feller 2003). Bei hohen Temperaturen produzieren Obstgehölze weniger Trockenmasse, da eine geringere Netto-Photosyntheserate infolge einer höheren Respirationsrate stattfindet (Han et al. 2012). Dies ist im Obstbau mit einer Abnahme der Fruchtgrößen und somit mit einer Ertragsreduktion verbunden.

Hitzestress während der Blütendifferenzierung kann bei Kirschen zur Formation von Doppelfrüchten im Folgejahr führen. Diese Missbildungen wurden verstärkt beobachtet, nachdem die Gehölze im Sommer und Frühherbst für einen längeren Zeitraum Temperaturen über $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ausgesetzt waren (Beppu und Kataoka 1999, Micke et al. 1983, Philp 1933).

Aus diesem Grund wurde die Anzahl der Tage mit einer Maximumtemperatur über 30 °C im Entwicklungs- und Ertragsbildungszeitraum, sowie in den Monaten von August bis September untersucht.

5.3.1.5 Temperaturverhältnisse in der Blütezeit

Die meisten für den Intensivanbau von Sauerkirschen wichtigen Sorten sind selbstfruchtbar. Windbestäubung ist aber nur bis zu einem gewissen Umfang möglich, sodass zum Erreichen von hohen Erträgen der Einsatz von Insekten nötig ist. Honigbienen (*Apis mellifera*) sind aufgrund ihrer hohen Nachfrage an Pollen und Nektar, sowie ihres haarigen Körpers, welcher Pollen sammelt und verbreitet, die wichtigsten Bestäuber von Sauerkirschen (Benedek et al. 1996, Delaplane und Mayers 2000). Die Bienenflugintensität und die damit verbundene Bestäubung von Obstgehölzen ist stark von den Witterungsverhältnissen während der Blüte abhängig. Die wichtigsten Einflussfaktoren für die Flugintensität sind Lufttemperatur, Niederschlagshöhe, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit. Bienen sind vor Sonnenaufgang und nach Sonnenuntergang nur selten flugaktiv. Geringe Windgeschwindigkeiten haben wenig Einfluss auf den Bienenflug, erst bei hohen Werten setzt eine Flugabnahme ein. Während Niederschlagsereignissen, sowie bei starker Bewölkung wurde eine deutlich geringere Flugintensität beobachtet (DWD 2013). Das Flugverhalten der Bienen wird maßgeblich von der Lufttemperatur beeinflusst. Die Futtersuche der Bienen ist bei einer Lufttemperatur unter 13 °C nur sehr gering (Sommerville 1999, Thomas et al. 2012). Optimale Temperaturverhältnisse zur Nahrungssuche liegen zwischen 19 und 40 °C (Jaycox 1977, Sommerville 1999).

In dieser Arbeit wurde die mögliche Bienenflugintensität anhand der Temperaturverhältnisse während der Blüte untersucht. Hierzu wurden stündliche Temperaturwerte von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang verwendet. Die Intensität der Nahrungssuche von Honigbienen wurde in drei Klassen unterteilt. Bei Lufttemperaturen von ≥ 12.8 -15.6 °C besteht eine geringe Flugaktivität (FI_1), im Bereich von > 15.6-18.3 °C findet eine mäßige Futtersuche statt (FI_2) und bei Temperaturen > 18.3 °C ist die Nahrungssuche maximal (FI_3 ; Sagili und Burgett 2011).

5.3.2 Phänologische Modelle

Um Veränderungen im Eintreten der Entwicklungsstadien unter geänderten Klimabedingungen abzuschätzen, war es notwendig phänologische Modelle zu erstellen, bzw. vorhandene Modelle anzuwenden. Im Rahmen dieser Studie wurden drei reine Forcing-Modelle und vier sequentiell gekoppelte Chilling-Forcing-Modelle (CF) zur Bestimmung des Blühbeginns der Sauerkirsche (BBCH 60) für die Anbauggebiete in Rheinlandpfalz entwickelt. Diese wurden mit meteorologischen und phänologischen Beobachtungen der GPM- und CLIMARK-Stationen validiert, um die Güte der Modelle zu bestimmen und die mögliche Anwendung der Modelle in diesen Regionen zu überprüfen. Im zweiten Schritt wurde ein reines Forcing-Modell zur Vorhersage des Endes der Sauerkirschblüte (BBCH 69) entwickelt. Weitere phänologische Stadien [BBCH: 53 („Side green“), 54 („Green tip“), 55 („Tight cluster“), 56 („Open cluster“) und 57 („First white“)] wurden mit dem Modell von Zavalloni et al. (2006) berechnet. Dies ist ein reines Forcing-Modell, welches Growing Degree Days (GDD) nach der Baskerville und Emin-Methode (1969) akkumuliert.

5.3.2.1 Chilling-Modelle

In gemäßigten Breiten gelangen Obstgehölze im Herbst in einen winterlichen Ruhezustand (Dormanz). Erst nach Erfüllung eines bestimmten Kältebedürfnisses (chilling requirement) ist die Dormanz gebrochen und für das Wachstum der Gehölze förderliche Temperaturen können zur Entwicklung der Knospen und Blätter im Frühjahr beitragen (Chmielewski et al. 2011). Fruchtarten, aber auch Fruchtsorten haben unterschiedliche Kältebedürfnisse, die oft in Chilling-Hours (CH) angegeben werden. Da sich der Termin des Endes der Dormanz unter geänderten klimatischen Bedingungen möglicherweise verschiebt, wurde das Kältebedürfnis in den entwickelten phänologischen Modellen berücksichtigt.

Zur Berechnung des spezifischen Kältebedürfnisses (C^*) für Sauerkirschen wurden zwei Chilling-Modelle aus der Literatur herangezogen. Der erste Ansatz ist das häufig verwendete 32-45 °F Modell oder Chilling-Hours Modell (Weinberger-Eggert Methode; siehe Weinberger 1950 und Eggert 1951):

$$S_c(t) = \sum_{i=t_0}^t \sum_{h=1}^{24} R_c(T_{ih}) \quad (3)$$

$$S_c(t_1) \geq C^* \quad (4)$$

S_c ist die zum Zeitpunkt t akkumulierte Kältesumme (State of Chilling). t_l ist die kleinste ganze Zahl, für die $S_c(t_l) \geq C^*$ gilt. Zum Zeitpunkt t_l wird die Dormanz gebrochen bzw. ist das Kältebedürfnis erfüllt. T_{ih} ist die Lufttemperatur am Tag i zur Stunde h . R_c ist die Chilling-Rate für jeden einzelnen Berechnungsschritt. Im 32-45 °F Modell wird eine CH als Stunde mit einer Temperatur zwischen 0 und 7.2 °C definiert (Gl. 5).

$$R_c(T_{ih}) = \begin{cases} 0 \text{CH} & \text{wenn } T_{ih} \leq 0 \text{ °C} \text{ oder } T_{ih} \geq 7.2 \text{ °C} \\ 1 \text{CH} & \text{wenn } 0 \text{ °C} < T_{ih} < 7.2 \text{ °C} \end{cases} \quad (5)$$

Das 32-45 °F Modell wird von Obstbauern und Züchtern noch weitgehend verwendet und wurde deswegen in diese Studie aufgenommen. Dieser Ansatz hat jedoch verschiedene Unzulänglichkeiten. Das Modell berücksichtigt den Effekt von niedrigen Temperaturen gefolgt von warmen Perioden nicht und nimmt keine Wichtung der stündlichen Temperaturen entsprechend ihres Einflusses auf die Freisetzung der Dormanz vor. Die Summe dieser Effekte spielt allerdings eine wichtige Rolle in der Akkumulation des Kältebedürfnisses von Obstgehölzen (Erez et al. 1979a, Erez et al. 1979b, Erez und Couvillon 1987).

Als zweiter Ansatz zur Bestimmung des Kältebedürfnisses wurde das komplexe Dynamic Modell (Darbyshire 2011, Fishman et al. 1987a, 1987b) verwendet. Die Chilling-Menge wird hierbei in Chilling-Portions (CP) anstelle von Chilling-Hours angegeben. Dieses Modell unterscheidet sich vom 32-45 °F Modell dadurch, dass akkumulierte Chilling-Mengen durch warme Temperaturen auch wieder abgebaut werden können. In einem ersten Schritt wird durch das Auftreten von Temperaturen zwischen 0 und 12 °C, mit einem Optimum zwischen 6 und 8 °C die Formation eines Zwischenprodukts gefördert (Gl. 6). Das Auftreten von warmen Witterungsabschnitten kann dieses Zwischenprodukt wieder abbauen, während Temperaturen zwischen 13 und 16 °C gekoppelt mit kälteren Phasen die Akkumulation des Zwischenprodukts fördern. Wenn eine gewisse Menge an Zwischenprodukt akkumuliert wurde ($x(t) \geq 1$), wird diese als eine irreversible Chilling-Portion festgeschrieben (Gl. 7).

$$x(t) = x_s - (x_s - x(t-1)) \cdot \exp(-k_1) \quad (6)$$

$$\text{Falls } (x(t) \geq 1), \text{ dann } \begin{cases} \text{delt} = x(t) \cdot P_t \\ CP = CP + \text{delt} \\ x(t) = x(t) - \text{delt} \end{cases} \quad (7)$$

x_s , k_1 und P_t sind feste Funktionen der Lufttemperatur T_{ih} und hängen darüber hinaus noch von den 6 folgenden Konstanten ab:

$$\begin{aligned}
A_0 &= 139500 \text{ h}^{-1} \text{ (rate coefficients)} \\
A_1 &= 2.567 \cdot 10^{18} \text{ h}^{-1} \\
E_0 &= 4153.5 \text{ K (energies of activation)} \\
E_1 &= 12888.8 \text{ K} \\
c &= 1.6 \text{ K}^{-1} \\
d &= 277 \text{ K}
\end{aligned} \tag{8}$$

Gestartet wird das Modell mit $x(t = 1) = 0$ und $CP = 0$. Die Zeit t wird jede Stunde um eins erhöht. Wenn CP größer als (C^*) wird, ist die Dormanz gebrochen.

In beiden Modellen, dem Dynamic und dem 32-45 °F Modell, wurde als Starttag zur Akkumulation der Chilling-Portions / Chilling-Hours der 1. September ausgewählt. Das Dynamic Modell bestimmt den Starttag automatisch (wenn das erste Mal $x(t) \geq 1$ ist), aber zur Vereinheitlichung wird der 1. September angenommen, was jedoch keinen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

5.3.2.2 Forcing-Modelle

Die Lufttemperatur ist einer der wichtigsten Faktoren, der die ontogenetische Entwicklung von Gehölzen reguliert (Chuine et al. 2010). In der Literatur findet man verschiedene Ansätze, die durch Temperatursummenmodelle (Forcing-Modelle) phänologische Phasen von Pflanzen bestimmen. Zwei Methoden die sich vielfach bewährt haben, sind das Growing-Degree-Day-Modell (GDD-Modell; Robertson 1968, Cannell und Smith 1983) und die logistische Funktion von Sarvas (1974) und Hänninen (1990).

Die kritische Forcing-Summe (F^*) zum Eintreten einer phänologischen Phase kann mit Gleichung 9 und 10 beschrieben werden. Hierbei ist $S_f(t)$ die Forcing-Summe zum Zeitpunkt t , auch State of Forcing genannt, t_2 ist der Blühbeginn und $R_f(T_i)$ ist die Forcing-Rate, die täglich akkumuliert wird. Die Akkumulation beginnt normalerweise nach dem Brechen der Dormanz (t_1), wenn förderliche Temperaturen für die ontogenetische Entwicklung auftreten. Die Forcing-Menge wird durch die Tagesmitteltemperatur T_i am Tag i und einer pflanzen-spezifischen Basistemperatur (T_{BF}) bestimmt (Gl. 11).

$$S_f(t) = \sum_{i=t_1}^t R_f(T_i) \tag{9}$$

$$S_f(t_2) \geq F^* \tag{10}$$

In dieser Arbeit wurden drei verschiedene Ansätze zur Berechnung der Forcing-Rate berücksichtigt:

1. Die konventionelle GDD-Methode:

$$R_f(T_i) = \max(0, T_i - T_{BF}) \quad (11)$$

2. Eine modifizierte GDD-Methode von Blümel und Chmielewski (2012), welche die Tageslänge während der Pflanzenentwicklung miteinbezieht. Mehrere Studien haben auf einen möglichen Einfluss der Tageslänge auf die ontogenetische Entwicklung von Laub- und Nadelbäumen hingewiesen (z.B. Körner 2006, Körner und Basler 2010, Linkosalo et al. 2006). Heide (2008) beschreibt eine ausgeprägte Interaktion zwischen Fotoperiode und Temperatur in der Wachstumsregulation in *Prunus* Spezies (Pflaumen, Süß- und Sauerkirschen).

$$R_f(T_i) = \max(0, T_i - T_{BF}) \cdot \left(\frac{DL}{10h} \right)^{EXPO} \quad (12)$$

DL ist dabei die Zeit (in Stunden) von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang und hängt vom Tag im Jahr (Julianday) und von der geografischen Position ab. Die „10h“ im Nenner wurden nur zur Normierung eingeführt, damit sich für alle Modellversionen F^* -Werte in gleicher Größenordnung ergeben. $EXPO$ ist ein neuer Modellparameter. Der Wert von $EXPO$ hängt von der Fruchtart und dem betrachteten Gebiet ab und kann zusammen mit den anderen Parametern optimiert werden. Die akkumulierte Forcing-Menge wird hier in Foto-Thermischen Einheiten (photo-thermal units, PTU) ausgedrückt. Dieser Ansatz wird nachfolgend als PTU-Modell bezeichnet.

3. Eine modifizierte GDD-Methode (Gl. 13-15) nach Baskerville und Emin (1969). Hierbei wird eine Sinuskurve in das tägliche Temperaturminimum und -maximum eingepasst. Bei der anschließenden Berechnung der GDD wird die Fläche oberhalb der Basistemperatur (T_{BF}) und unterhalb der Sinuskurve ermittelt.

$$R_f(T_i) \begin{cases} 0 & \text{wenn } T_x < T_{BF} \\ \frac{1}{\pi} W \cos A - \frac{1}{\pi} (T_{BF} - T) \left(\frac{\pi}{2} - A \right) & \text{wenn } T_x > T_{BF} \text{ und } T_n < T_{BF} \\ T - T_{BF} & \text{wenn } T_n > T_{BF} \end{cases} \quad (13)$$

$$W = \frac{T_x - T_n}{2} \quad (14)$$

$$A = \arcsin\left(\frac{T_{BF} - T}{W}\right) \quad (15)$$

T ist die mittlere Lufttemperatur, welche aus dem Mittelwert der täglichen maximalen (T_x) und minimalen (T_n) Lufttemperatur berechnet wird.

Die Güte der Modelle wurde mit dem Root Mean Square Error ($RMSE$) zwischen beobachteten und simulierten Werten bestimmt:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_{pi} - d_{oi})^2}{N}} \quad (16)$$

d_{pi} ist der simulierte Termin des Blühbeginns im Jahr i , d_{oi} ist der beobachtete Termin im Jahr i und N ist die Anzahl der Beobachtungsjahre. Zusätzlich wurde der $RMSE$ mit dem $RMSE0$ verglichen, welcher der Root Mean Square Error des „0-Modells“ ist, bei dem der mittlere Blühbeginn als Vorhersagetermin verwendet wird. Dieser Wert ist (mit Ausnahme des Faktors $\sqrt{N/(N-1)}$) identisch mit der Standardabweichung (SD) der Beobachtungen:

$$RMSE0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{d}_{oi} - d_{oi})^2}{N}} \quad (17)$$

\bar{d}_{oi} ist der Mittelwert des beobachteten Blühbeginns der untersuchten Periode.

$1 - \frac{RMSE^2}{RMSE0^2} = R^2$ ist der Determinationskoeffizient ($1 =$ perfektes Modell; $< 0 =$ Modell ungenauer als der einfache Mittelwert).

5.3.2.3 Optimierung und Validierung der phänologischen Modelle

Zum Erstellen phänologischer Modelle zur Vorhersage des Blühbeginns von Sauerkirschen wurden die phänologischen und meteorologischen Beobachtungen aus Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1962-2009 in zwei Hälften geteilt. Die geraden Jahre dienten zur Optimierung der Modelle, während die ungeraden Jahren zur Validierung benutzt wurden (interne Validierung). Die Optimierung der Modellparameter erfolgte mittels „Simulated Annealing“ (Chmielewski et al. 2009a, Cerny 1985, Kirkpatrick et al. 1983, Metropolis et al. 1953, Press et al. 1997) innerhalb vorgegebener Bereiche für jeden der vier Gitterpunkte einzeln (Tab. 5). Bei dieser

Vorgehensweise werden alle Modellparameter solange variiert, bis der kleinste Wert des Root Mean Square Errors ($RMSE_{opt}$), zwischen beobachteten und modellierten Blühbeginn, gefunden ist. Die vier optimierten Parametersätze (einen pro Gitterpunkt) wurden dann gemittelt, um ein phänologisches Modell für die gesamte Anbauregion zu erhalten und mit den Beobachtungen der ungeraden Jahre (24 Jahre) validiert ($RMSE_{val}$). Abschließend erfolgte eine Validierung der besten Modelle an unabhängigen phänologischen Beobachtungen der GPM- und CLIMARK-Stationen (externe Validierung).

Tab. 5: Ausgewählte Optimierungsbereiche der Modellparameter zur Vorhersage des Blühbeginns und Blühendes von Sauerkirschgehölzen (t_l = Starttag der Forcing-Akkumulation, T_{BF} = Basistemperatur, C^* = Chilling-Bedürfnis, F^* = Forcing-Summe, $EXPO$ = regional- und fruchtspezifischer Parameter, DOY = Day of year, CH = Chilling-Hours, CP = Chilling-Portion, GDD = Growing Degree Days, PTU = Photo Thermal Units).

Modellparameter	Einheit	Optimierungsbereich
t_l (nur bei M1)	[DOY]	32, 36, 41, 46, 51, 56, 60, 64, 69,
T_{BF}	[°C]	0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0
C^*	[CH,	400 – 1800 (in 0.1 Schritten variiert)
	[CP]	25 – 100 (in 0.1 Schritten variiert)
F^*	[GDD, PTU]	50 – 1000 (in 0.1 Schritten variiert)
$EXPO$	[-]	0.0 - 5.0 (in 0.01 Schritten variiert)

Im Rahmen dieser Arbeit wurden sieben Modelle zur Vorhersage des Blühbeginns von Sauerkirschen entwickelt. Davon sind drei reine Forcing-Modelle und vier sequentiell gekoppelte Chilling-Forcing-Modelle (CF).

Das erste Modell (M1) ist ein simpler GDD-Ansatz mit optimiertem Starttag. Hierfür wurden die Parameter t_l , T_{BF} und F^* gefittet (Tab. 6). Die Optimierung erfolgte mit neun verschiedenen Startagen (t_l : DOY 32-69; Tab. 5). Das zweite Modell (M2DL) ist ein GDD-Modell mit Tageslängenterm (PTU-Ansatz). Hier wurden die Parameter $EXPO$, T_{BF} und F^* optimiert und der 1. Januar als Starttag für die GDD-Akkumulation ausgewählt (Tab. 6). Um den Einfluss der Fotoperiode zu untersuchen, wurde dasselbe Modell (t_l = 1. Januar) ohne Tageslängenterm an Beobachtungsdaten optimiert (M2). Die weiteren vier Modelle sind sequentielle CF-Modelle, welche den Weinberger-Eggert-Ansatz (M3DL) und das Dynamic Modell (M4DL) mit der modifizierten GDD-Methode (PTU-Ansatz) kombinieren (Tab. 6). In diesen beiden Modellen wurden die Parameter $EXPO$, C^* , T_{BF} und F^* optimiert. Der Starttag

für die Chilling-Akkumulation ist dabei der $t_0 = 1.$ September und der Starttag für die Forcing-Modelle (t_l) ist der simulierte Termin, bei dem für das jeweilige Jahr die Dormanz gebrochen war. Der Einfluss der Tageslänge wurde auch hier mit denselben Modellen ohne Tageslängenterm überprüft (M3 und M4).

Der Termin des Blühendes von Sauerkirschen wurde durch ein GDD-Modell (M5) bestimmt. In diesem Fall bezeichnet t_l nicht den Beginn der Forcing-Phase bzw. das Ende der Dormanz, sondern den Blühbeginn, und t_2 steht nun für den gesuchten Termin des Blühendes. t_l wird aus dem beobachteten Blühbeginn für das jeweilige Jahr oder aus zuvor durchgeführten Modellrechnungen vorgegeben. Auch hier werden die geraden Jahre zur Optimierung und die ungeraden Jahre zur Verifizierung verwendet. Hier wurden die Parameter T_{BF} und F^* optimiert (Tab. 6).

Tab. 6: Übersicht über die verwendeten Chilling- und Forcing-Modelle und die zu optimierenden Parameter für die Vorhersage des Blühbeginns (M1, M2DL, M2, M3DL, M3, M4DL) und Blühendes (M5) von Sauerkirschgehölzen (T_{BF} = Basistemperatur, F^* = Forcing-Summe, t_l = Starttag der Forcing-Akkumulation, $EXPO$ = regional- und fruchtspezifischer Parameter, C^* = Chilling-Bedürfnis).

Modellab- kürzung	Chilling-Modell	Forcing-Modell	Optimierte Parameter
M1	-	GDD-Modell (Gl. 9-11)	T_{BF}, F^*, t_l
M2DL	-	PTU-Modell (Gl. 9-10, 12)	$T_{BF}, F^*, EXPO$
M2	-	GDD-Modell (Gl. 9-11)	T_{BF}, F^*
M3DL	Weinberger-Eggert-Modell (Gl. 3-5)	PTU-Modell (Gl. 9-10, 12)	$T_{BF}, F^*, C^*, EXPO$
M3	Weinberger-Eggert-Modell (Gl. 3-5)	GDD-Modell (Gl. 9-11)	T_{BF}, F^*, C^*
M4DL	Dynamic-Modell (Gl. 6-8)	PTU-Modell (Gl. 9-10, 12)	$T_{BF}, F^*, C^*, EXPO$
M4	Dynamic-Modell (Gl. 6-8)	GDD-Modell (Gl. 9-11)	T_{BF}, F^*, C^*
M5	-	GDD-Modell (Gl. 9-11)	T_{BF}, F^*

Weitere phänologische Stadien wurden mit dem Modell von Zavalloni et al. (2006) berechnet. Dies ist ein reines Forcing-Modell, mit Starttag am 1. März. Die GDD werden hier nach der Baskerville und Emin-Methode (1969) akkumuliert (Gl. 9-10 und 13-15). Tabelle 7 zeigt die nötigen Forcing-Mengen zum Erreichen der phänologischen Entwicklungsstadien.

Tab. 7: Anzahl von Growing Degree Days (GDD) bis zum Eintreten des Entwicklungsstadiums mit Starttag am 1. März nach dem phänologischen Modell für Sauerkirschen von Zavalloni et al. (2006).

Entwicklungsstadium	GDD
Side green (SG)	120
Green tip (GT)	144
Tight cluster (TC)	164
Open cluster (OC)	180
First white (FW)	198
Blühbeginn (BB)	218

5.3.3 Berechnung von Frostschäden

Um das Risiko von Spätfrost während der Entwicklung und die dadurch verursachten Schäden im Sauerkirschanbau abschätzen zu können, wurden mit Hilfe von phänologischen- und Temperaturdaten verschiedene Frostwahrscheinlichkeiten und Frostschäden berechnet. Dafür wurde in einem ersten Schritt der Blühbeginn (BB) mit dem sequentiell gekoppelten CF-Modell M4DL bestimmt und anschließend das GDD-Modell M5 zur Berechnung des Blühendes (BE) verwendet. Die Entwicklungsstadien Side green (SG), Green tip (GT), Tight cluster (TC), Open cluster (OC) und First white (FW) wurden mit dem GDD-Modell nach Zavalloni et al. (2006) bestimmt. In dieser Arbeit wurde abweichend von Zavalloni et al. (2006) nicht der 1. März als Starttag für die Berechnung der phänologischen Termine SG, GT, TC, OC und FW verwendet, sondern der mit Modell M4DL bestimmte Blühbeginn. Durch diese Vorgehensweise konnte die direkte Anwendung eines reinen Forcing-Modells mit optimiertem Starttag vermieden werden, da dieses Modell unter geänderten Klimabedingungen große Schwächen aufweisen (Chmielewski und Blümel 2013).

Zunächst wurde die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Spätfrost (F_W) berechnet. Hierzu wurden alle Jahre gezählt, in denen die Tagesminimumtemperatur zwischen dem Entwicklungsstadium Side green (SG) und der Pflückreife (PR) wenigstens an einem Tag kleiner als 0 °C war.

Bei der Berechnung der Frostschäden wurde zwischen Schäden an den Knospen, bzw. Blüten (F_S) und Schäden an den späteren Früchten (F_F) unterschieden. Im Winter können Sauerkirschgehölze Temperaturen von bis ca. -20 °C ausgesetzt werden ohne Schäden davonzutragen, doch nimmt die Empfindlichkeit gegenüber Frost mit dem Voranschreiten der

Entwicklung im Frühjahr deutlich zu. In Tabelle 8 sind für neun phänologische Stadien die Temperaturen bei denen ein 10 % (T_{10}) und 90 % (T_{90}) Schaden entsteht, angegeben (Dennis und Howell 1974). Weitere Schadenstemperaturen (T_K) wurden durch eine exponentielle Funktion, mit T_0 (0 °C = kein Schaden), T_{10} und T_{90} als Fixpunkte, berechnet:

$$F_S(T_K) = a^{((-b \cdot T_K)^{-1})} \quad (18)$$

Dabei sind a und b Koeffizienten zur Bestimmung der exponentiellen Kurve. Die bisher berechneten Schäden (F_S) sind Schäden an den Knospen, bzw. Blüten. Diese sind aber nicht identisch mit dem Ertragsverlust durch Frost (S_F). Gemäß Angaben des „Northwest Michigan Horticulture Research Centers (NWMHRC)“ kann bei Sauerkirschen nach einem Blütenschaden von 50 % noch fast Vollertrag erreicht werden. Deswegen mussten die Knospen, bzw. Blütenschäden mit einer Transformation abgesenkt werden, um korrekte Obstschäden zu erhalten. Die Transformation wurde folgendermaßen angesetzt:

$$S_F = 0.2 F_S \quad [\text{für } F_S \leq 0.5] \quad (19)$$

$$S_F = 1.8 F_S - 0.8 \quad [\text{für } F_S > 0.5] \quad (20)$$

Abbildung 6 zeigt die exponentielle Kurve zur Berechnung der Knospen, bzw. Blütenschäden und die durch die Transformation erhaltene Kurve der Fruchtschäden. Hierbei wird angenommen, dass die Fruchtschäden bis zu einem Blütenschaden von 50 % relativ gering bleiben (Gl. 19, bei $F_S = 50$ % ist S_F genau 10 %). Bei Blütenschäden über 50 % hingegen nehmen die Ertragsverluste stark zu (Gl. 20; dies entspricht damit in etwa den Angaben des NWMHRC).

Tab. 8: Kritische Temperaturen (T_K) in °C für 10 % (T_{10}) und 90 % (T_{90}) Knospen-, bzw. Blütenschaden der Sauerkirschsorte „Montmorency“ bei neun phänologischen Stadien (Dennis und Howell 1974).

	Phänologisches Stadium							
	Side green	Green Tip	Tight cluster	Open cluster	First white	Blü- beginn	Voll- blüte	Blü- ende
T_{10}	-4.4	-3.3	-3.3	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2
T_{90}	-12.2	-5.5	-4.4	-4.4	-4.4	-4.4	-4.4	-4.4

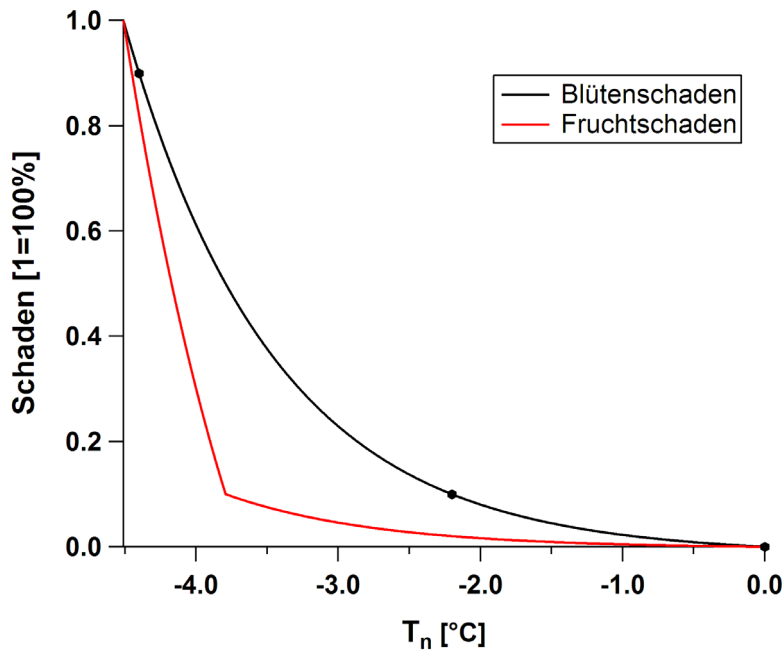


Abb. 6: Funktion zur Bestimmung der Blütenschäden von Sauerkirschgehölzen (F_S) (schwarze Kurve) durch die tägliche Minimumtemperatur (T_n), mit Fixpunkten bei 0 %, 10 % und 90 % Schaden (schwarze Punkte), sowie die zur Transformation in Fruchtschäden (S_F) verwendete Funktion (rote Kurve).

Die kritischen Schadenstemperaturen beziehen sich immer auf ein bestimmtes phänologisches Stadium (Tab. 8). Die Empfindlichkeit der Knospen, bzw. Blüten gegenüber Frost nimmt aber in der Entwicklungsphase zwischen den phänologischen Stadien stufenweise zu. In dieser Arbeit wurde jedoch angenommen, dass eine bestimmte kritische Temperatur im Zeitraum zwischen zwei phänologischen Stadien konstant bleibt. Somit verursacht z.B. eine Temperatur von -12.2 °C vom Entwicklungsstadium SG bis zu GT einen 90 % Schaden an den Knospen, bzw. Blüten (Tab. 8).

Bei der Berechnung der Blütenschäden wurde berücksichtigt, dass während der Entwicklung der Sauerkirschgehölze an mehreren Tagen Schadenstemperaturen auftreten können. Hierzu wurde der Schaden nach dem ersten Frostereignis bestimmt (Gl. 18). Dabei ist von den gesamten Blüten ein bestimmter Anteil geschädigt worden. Tritt im selben Jahr ein zweites Frostereignis auf, so werden die Schäden am verbleibenden Anteil von Blüten berechnet. Zum Termin des Blühendes wird der gesamte, bisher aufgetretene Blütenschaden ($F_{S,ges}^n$; Gl. 21) auf den Fruchtschaden (S_F) umgerechnet (Gl. 19 und 20). Bei Frostereignissen nach Blühende wird angenommen, dass sie sich direkt auf die kleinen Früchte auswirken. In die Formel (21)

sind daher die Fruchtschäden S_F^n anstelle der Blütenschäden F_S^n und die Gesamtschäden an den Früchten $S_{F,ges}^n$ anstelle der Gesamtschäden an den Blüten $F_{S,ges}^n$ einzusetzen.

$$F_{S,ges}^n = 1 - (1 - F_{S,ges}^{n-1}) \cdot (1 - F_S^n) ; \quad n \in \{1, 2, 3, \dots\} \quad (21)$$

Der sich zum Ende der Entwicklungsphase aus dieser Vorgehensweise ergebene Wert $S_{F,ges}^n$ ist der gesuchte Gesamtschaden am Ertrag im betrachteten Jahr.

6 Ergebnisse

6.1 Phänologische Modellierung

6.1.1 Optimierung der Modelle

Zunächst war es notwendig auf der Grundlage von meteorologischen und phänologischen Daten aus Rheinland-Pfalz, Modelle zur Vorhersage des Blühbeginns und Blühendes von Sauerkischgehölzen zu berechnen. Die optimalen Modellparameter und RMSE sind Mittelwerte der vier untersuchten Gitterpunkte (Tab. 9). Bei dem reinen GDD-Modell M1 betrug die optimale Basistemperatur 2 °C, mit einem optimalen Starttag für die Forcing-Akkumulation am 1. März (DOY 60) und einem $RMSE_{opt}$ von 2.57 Tagen ($RMSE0_{opt} = 7.38$ Tage). Die Ergebnisse der Modelle mit und ohne Tageslängenterm weisen beträchtliche Unterschiede auf. Die optimale Basistemperatur für die Modelle ohne DL variiert zwischen 0 °C für das Modell M2 ($t_l = 1$ DOY) und 4.0 °C für das gekoppelten CF-Modell M3. Die Modelle mit DL-Term haben alle eine optimale Basistemperatur von 1.0 °C (M2DL, M3DL, M4DL). Für Modelle zur Vorhersage des Blühbeginns findet man in der Literatur Basistemperaturen zwischen 2.5 °C und 4 °C (Ladanyi et al. 2009, Zavalloni et al. 2006).

Tab. 9: Optimale Parameter der phänologischen Modelle für den Blühbeginn (M1, M2DL, M2, M3DL, M3; M4DL, M4; siehe Tab. 6) und das Blühende (M5; siehe Tab. 6) der Sauerkirsche in der Anbauregion Rheinland-Pfalz (Mittelwert der vier Gitterpunkte) und Root Mean Square Error ($RMSE$) für den Optimierungs- (R_{opt}) und internen Validierungszeitraum (R_{val} ; t_l^{ber} ist der berechnete Termin des Endes der Dormanz; t_2^{obs} ist der beobachtete Blühbeginn; die Werte in Klammern sind die maximalen und minimalen Werte der vier Gitterpunkte; Fehler des 0-Modells (siehe Gl. 17): $RMSE0_{val} = 7.21$ Tage).

Modell	t_0 [DOY]	t_l, t_2 [DOY]	T_{BF} [°C]	C^* [CH, CP]	F^* [GDD, PTU]	$EXPO$ [-]	R_{opt} [Tage]	R_{val} [Tage]
M1	-	60	2.0	-	250.7 (243-264)	-	2.57	4.30
M2DL	-	1	1.0	-	592.6 (580-607)	2.1 (1.88-2.26)	2.54	2.39
M2	-	1	0.0	-	534.8 (526-550)	-	6.30	6.35
M3DL	244	t_1^{ber}	1.0	1071.8 (1032-1112)	593.6 (583-616)	2.1 (1.98-2.25)	2.53	2.53
M3	244	t_1^{ber}	4.0	1548.2 (1535-1565)	189.3 (180-200)	-	4.55	4.48
M4DL	244	t_1^{ber}	1.0	74.1 (71.7-75.7)	567.4 (556-589)	2.1 (2.03-2.14)	2.19	2.38
M4	244	t_1^{ber}	2.5	89.1 (87.8-90.0)	262.4 (254-273)	-	4.15	3.76
M5	-	t_2^{obs}	0.0	-	155.3 (139-172)	-	2.42	2.95

Der $RMSE_{opt}$ der Modelle ohne DL lag bei 6.30 Tagen (M2), 4.55 Tagen (M3) und 4.15 Tagen (M4). Durch die Einführung des Tageslängenterms konnten die Fehler bei den gleichen Modellen um ca. die Hälfte verringert werden, wobei das gekoppelte CF-Modell, welches Chilling-Portions nach dem Dynamic Modell akkumuliert (M4DL) am genauesten war. Beim Modell zur Vorhersage des Blühendes (M5) betrug der Fehler hingegen 2.42 Tage.

In Tabelle 9 sind die optimalen Modellparameter für jedes phänologische Modell aufgelistet. Der $EXPO$ Parameter der DL-Modelle betrug bei allen Modellansätzen 2.1. Das benötigte Chilling-Bedürfnis C^* für die Modelle M3 und M4 betrug 1572.2 CH und 89.1 CP. Vergleicht man diese Werte mit Angaben aus der Literatur erscheinen diese Werte zu hoch. Anderson et al. (1986) gibt für Sauerkirschen ein C^* von 954 Chilling-Units (Utah und Michigan) an, während Marini (2009) von 1000 CH (Virginia) spricht. In den Modellen mit Tageslängenterm sind die Chilling-Bedürfnisse mit 1071.8 CH für M3DL und 74.1 CP für M4DL eher realistisch.

6.1.2 Validierung der Modelle

Die Güte der Modelle wurde mit den ungeraden Jahren vom Zeitraum 1962-2009 untersucht (interne Validierung). Für die Modelle M2, M3 und M4 mit und ohne DL war der $RMSE_{val}$ ähnlich dem $RMSE_{opt}$ (Tab. 9) [$RMSE_{0val} = 7.21$ Tage (Mittelwert der vier Gitterpunkte)]. Die größte Differenz wurde bei Modell M1 gefunden, wo der $RMSE$ um 1.73 Tage gestiegen ist (von 2.57 auf 4.30 Tage). Das Modell zur Vorhersage des Blühendes (M5) verzeichnete eine marginale Zunahme des $RMSE$ im Validierungszeitraum.

Abbildung 7 zeigt die Unterschiede zwischen dem modellierten (t_{2pred}) und beobachteten (t_{2obs}) Beginn der Sauerkirschblüte. Die größten Differenzen bei den DL-Modellen liegen bei ± 4 Tagen, während Modell M2 Abweichungen von -15 Tagen und +10 Tagen aufweist. Das 50. Perzentil weicht bei den DL-Modellen nur gering von Null ab, was auf eine geringe systematische Verfrühung oder Verspätung in der Vorhersage des Blühbeginns hinweist. Mit Ausnahme des 100. Perzentils, hat Modell M1 nur negative Differenzen und somit simuliert dieses Modell den Blühbeginn zu früh. Bei Modell M5 sind die Extremwerte -3.3 und +7.8 Tage, während das 25. und 75. Perzentil bei -1.4 und +2.1 Tagen liegt.

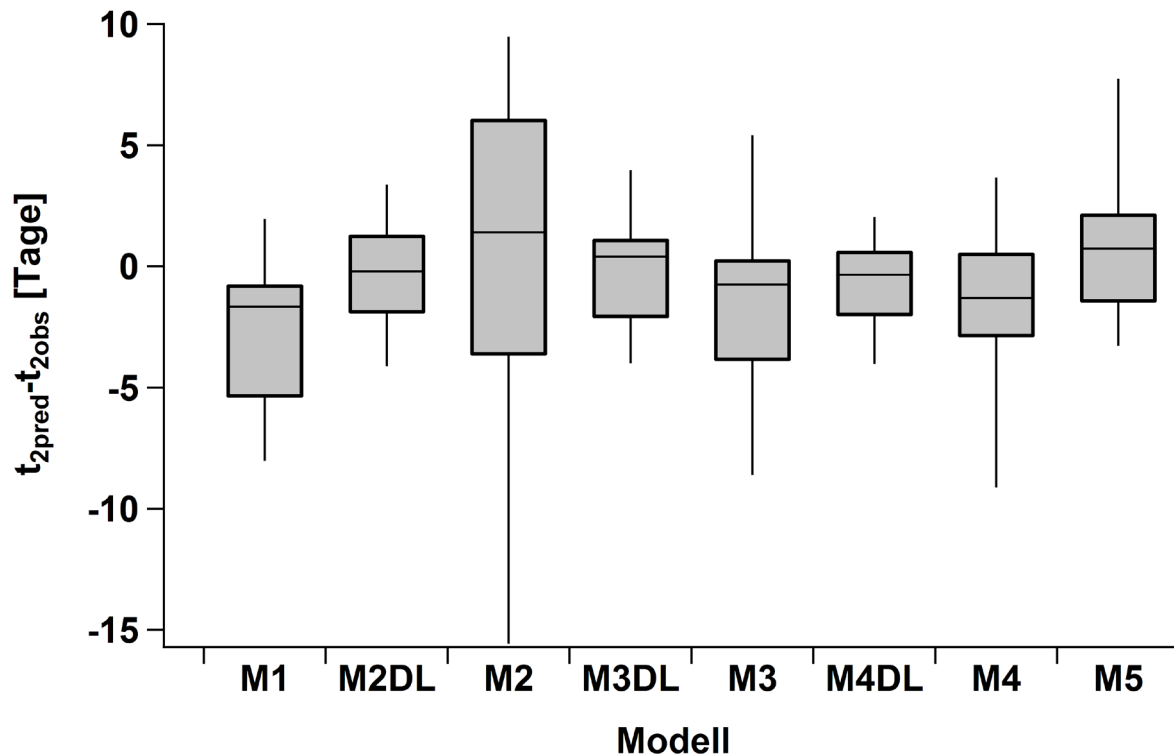


Abb. 7: Boxplot der Differenzen aus berechneten (t_{2pred}) und beobachteten (t_{2obs}) Terminen des Blühbeginns (Modell: M1, M2DL, M2, M3DL, M3, M4DL, M4, s. Tab. 6) und Blühendes (Modell: M5, s. Tab. 6) der Sauerkirsche für die interne Validierung (24 Jahre) in Rheinland-Pfalz.

Die Modelle ohne Tageslängenterm simulieren im allgemeinen frühe Termine des Blühbeginns zu früh und späte Termine zu spät. In Abbildung 8 wurde die Residualanalyse der Fehler in der Vorhersage des Blühbeginns $t_{2pred}-t_{2obs}$ mit den simulierten Terminen für Modell M3 und M3DL dargestellt (Wilks 2006). Eine große Steigung in der Regressionsgeraden weist auf einen hohen systematischen Fehler in der Vorhersage des Blühbeginns hin. Die Steigungen der Regressionsgeraden betrug +0.05, +0.44, +0.30 und +0.28 für die Modelle M1, M2, M3 und M4, während die Steigung bei den DL-Modellen +0.02, -0.04 und -0.07 für die Modelle M2DL, M3DL und M4DL war. Deswegen können zur Vorhersage des Blühbeginns durch die Verwendung der DL-Modelle systematische Fehler vermieden werden. Eine detaillierte Erläuterung der systematischen Fehler bei Modellen ohne DL kann in Blümel und Chmielewski (2012) gefunden werden.

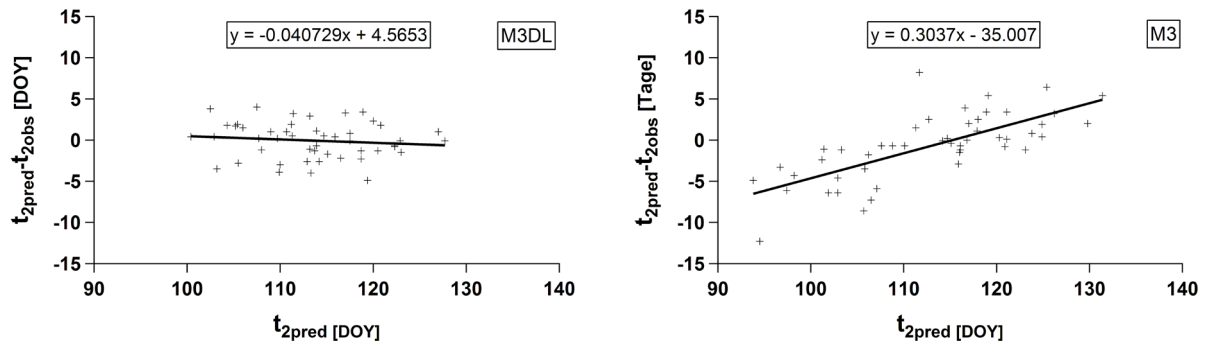


Abb. 8: Streudiagramm der Differenzen aus berechneten (t_{2pred}) und beobachteten (t_{2obs}) Terminen des Blühbeginns der Sauerkirsche als Funktion der prognostizierten t_2 -Werte für die phänologischen Modellen M3DL (links) und M3 (rechts) in Rheinland-Pfalz.

Anschließend wurden ausgewählte Modelle zur Vorhersage des Blühbeginns (M1, M2DL, M3DL, M4DL) an unabhängigen phänologischen Daten des GPM-Projekts validiert (externe Validierung). In Abbildung 9 sind die Differenzen zwischen beobachteten und simulierten Terminen des Blühbeginns dargestellt. Die Varianz der Differenzen war auch hier bei den gekoppelten CF-Modellen geringer. Ebenso wie bei der internen Validierung simuliert Modell M1 die Blühtermine zu früh.

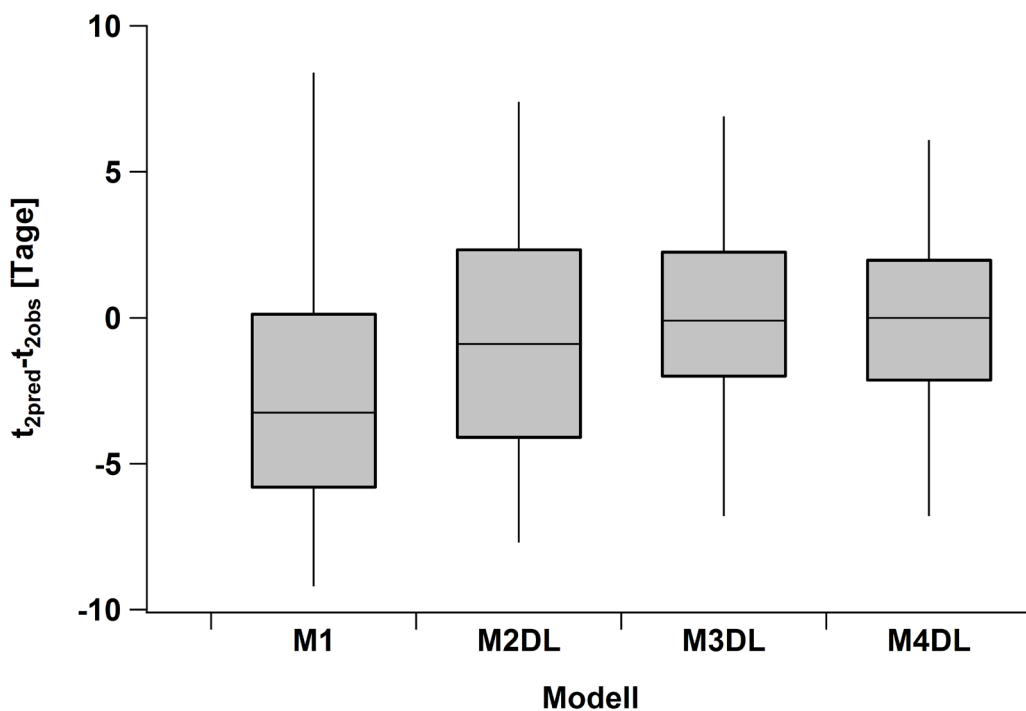


Abb. 9: Boxplot der Differenzen aus berechneten (t_{2pred}) und beobachteten (t_{2obs}) Terminen des Blühbeginns der Sauerkirsche (Modell: M1, M2DL, M3DL, M4DL, s. Tab. 6) für die externe Validierung (74 Einzeljahre) an 11 GPM-Stationen in Europa und den USA.

Bei den GPM-Stationen betrug der mittlere $RMSE_{val}$ der gekoppelten CF-Modelle 3.11 Tage für M3DL und 2.95 Tage für M4DL (Tab. 10). Auch an den Stationen Milwaukee (USA), Banska Bystrica (SK) und Schleswig (D) war der Fehler geringer als 4 Tage. Modell M1 hatte einen durchschnittlichen $RMSE_{val}$ von 4.27 Tagen. In Braunschweig (D), Tharandt (D), Prague (CZ) und Milwaukee (USA) lag der Fehler über 5 Tage. In Einzeljahren betrug der Fehler zwischen beobachtetem und modelliertem Blühbeginn mehr als 10 Tage. Modell M2DL zeigte eine geringere Genauigkeit als die gekoppelten CF-Modelle. Dies weist auf die Bedeutung des Chilling-Bedürfnisses in der Vorhersage des Blühbeginns für Sauerkirschen hin.

Tab. 10: Root Mean Square Error der externen Validierung ($RMSE_{val}$ in Tagen) für beobachtete und berechnete Termine des Blühbeginns der Sauerkirsche (Modell: M1, M2DL, M3DL, M4DL; s. Tab. 6) an GPM-Stationen in Europa und den USA (Sorte „Vladimirska“; $RMSE_0$ ist der $RMSE$ des 0-Modells (siehe Gl. 17)).

Station	M1	M2DL	M3DL	M4DL	$RMSE_0$
Braunschweig (D)	5.25	2.93	2.43	2.68	6.27
Berlin-Dahlem (D)	2.66	3.27	3.07	2.53	4.79
Geisenheim (D)	3.27	3.09	1.12	1.37	4.40
Offenbach (D)	1.21	3.51	3.72	2.43	3.67
Schleswig (D)	4.77	4.15	3.92	3.95	7.57
Tharandt (D)	6.54	4.26	4.23	4.36	5.17
Linden (D)	4.55	3.49	2.87	2.91	5.24
Graupa (D)	4.08	4.25	4.04	3.32	5.35
Praha (CZ)	5.18	3.16	3.13	2.87	6.59
Banska Bystrica (SK)	2.84	2.65	2.64	2.14	3.99
Milwaukee (USA)	6.59	3.95	3.02	3.89	5.03
MITTELWERT	4.27	3.52	3.11	2.95	5.28

Aus der Optimierung und Validierung (interne und externe) hat sich ergeben, dass das gekoppelte CF-Modell M4DL, welches die Kombination aus Dynamic Modell und GDD-Modell mit Tageslängenterm ist, das präziseste Modell zur Vorhersage des Blühbeginns in den untersuchten Anbauregionen war. Deswegen wurde dieses Modell (M4DL) an phänologischen und meteorologischen Beobachtungen der CLIMARK-Stationen getestet (Tab. 11). Der mittlere $RMSE$ für den Standort Przybroda in Polen betrug 3.73 Tage. Auch in den Anbau-

regionen Michigans erzielte das Modell M4DL gute Ergebnisse. Der größte Fehler hat sich mit 5.29 Tagen in Eau Claire ergeben, während der $RMSE$ in Maple City 3.28 Tage und in Hart 3.55 Tage betrug.

Tab. 11: Mean Square Error der externen Validierung ($RMSE_{val}$ in Tagen) für beobachtete und berechnete Termine des Blühbeginns der Sauerkirsche (Modell M4DL) an CLIMARK-Stationen in Polen und USA.

Station	Sorte	$RMSE$
Przybroda (POL)	English Morello	3.73
Eau Claire (USA)	Montmorency	5.29
Hart (USA)	Montmorency	3.55
Maple City (USA)	Montmorency	3.28

6.2 Künftige Klimaänderungen

Zur Beurteilung der Anbaubedingungen unter geänderten Klimaverhältnissen war es notwendig Klimaszenarien zu verwenden. Die vorgestellten Ergebnisse sind Mittelwerte aus den in Tabelle 3 angeführten regionalen Klimamodellen. Für die europäischen Sauerkirsch-anbauggebiete wurden 30-jährige Mittelwerte der Lufttemperatur und Niederschlagshöhe für die Zeiträume 1971-2000 (C20), 2011-2040 (P1), 2041-2070 (P2) und 2071-2100 (P3) berechnet. In den amerikanischen Anbauregionen konnten hingegen nur Auswertungen für die Zeitabschnitte C20 und P2 durchgeführt werden. Im Zeitraum 1971-2000 betrug das Jahresmittel der Lufttemperatur für Rheinland-Pfalz 9.6 °C. Die Monatsmittelwerte des Kontrolllaufs (C20) zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen (Tab. 12). Im Laufe dieses Jahrhunderts kann mit einer signifikanten Zunahme ($p < 0.05$) der Temperatur in allen Monaten gerechnet werden, wobei der Anstieg im Sommer und Winter (Differenz P3-C20 = +3.9 °C) am stärksten ist, während im Frühjahr (P3-C20 = +2.2 °C) die Temperaturen am geringsten zunehmen (Abb. 10). In den polnischen Anbaugebieten beträgt die mittlere Lufttemperatur im Kontrolllauf 8.5 °C (Tab. A1; A = Anhang). Hier wurde für den Winter (P3-C20 = +3.7 °C) der höchste und für den Sommer (P3-C20 = +2.5 °C) der geringste Temperaturanstieg berechnet (signifikant bei $p < 0.05$; Abb. A1).

In Michigan stimmt die Jahresmitteltemperatur im Kontrolllauf des Modells (Eau Claire: 9.9 °C, Hart: 7.7 °C, Maple City: 7.7 °C) mit den Beobachtungen gut überein (Tab. A1). Bei den Monatsmittelwerten treten hingegen Abweichungen von +1.0 °C bis -1.0 °C auf. In Eau

Claire wird in allen Jahreszeiten eine signifikante Temperaturzunahme von +2.3 °C für den Zeitraum P2 erwartet (Abb. A2). In den anderen beiden Anbauregionen ist im Frühjahr (P2-C20 = +3.7 °C) mit dem höchsten und im Winter (P2-C20 = +2.6 °C) mit dem geringsten Temperaturanstieg zu rechnen (signifikant bei $p < 0.05$; Abb. A2-3). Im Vergleich zu den Europäischen Anbaugebieten steigen die Temperaturen hier im Frühjahr um das Zweifache, während im Winter ungefähr die gleichen Veränderungen angenommen werden.

Tab. 12: Monats- und Jahresmittel der beobachteten (OBS) und modellierten (C20) Lufttemperatur (°C) im Zeitraum 1971-2000 in der Anbauregion Rheinland-Pfalz.

	Monat												Jahr
	Jan.	Feb.	Mär.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	
OBS	1.4	2.1	5.6	8.9	13.5	16.4	18.5	18.1	14.2	9.5	4.8	2.6	9.6
C20	1.3	2.1	5.4	8.8	13.5	16.4	18.4	18.0	14.2	9.4	4.8	2.5	9.6

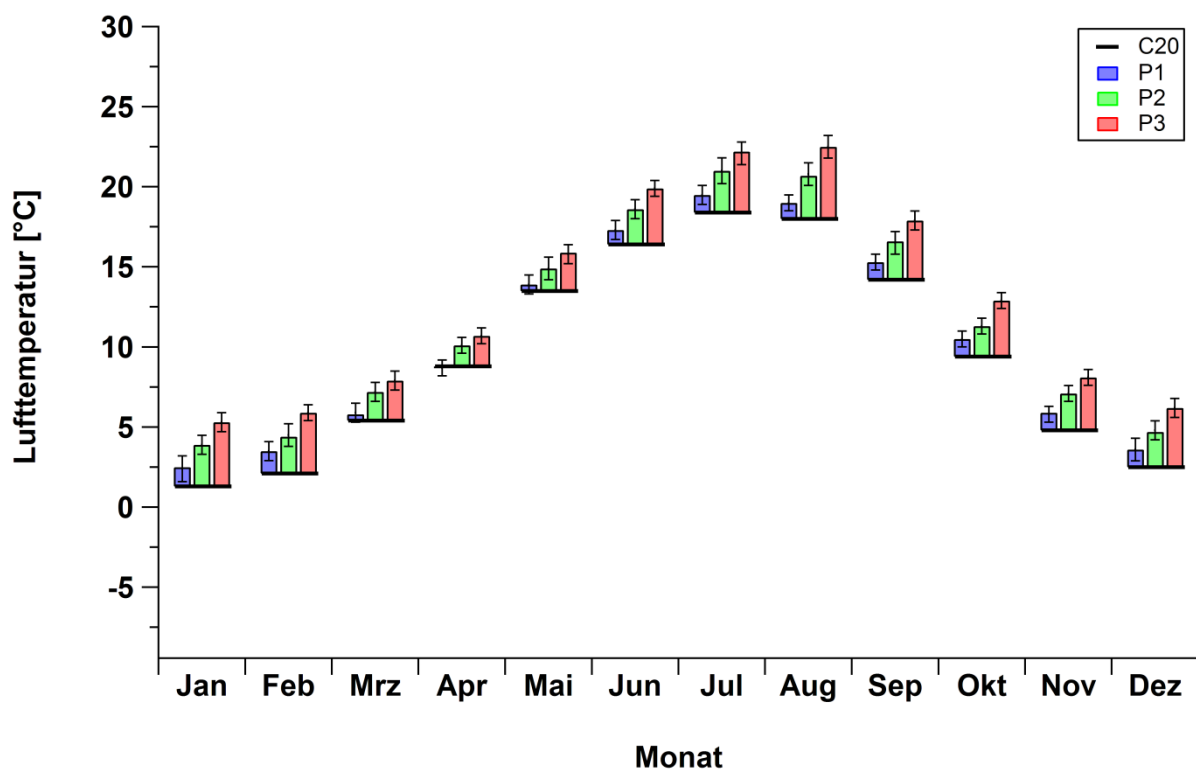


Abb. 10: Monatsmittelwerte der Lufttemperatur im Kontrolllauf (C20: 1971-2000) und Differenz zwischen den Zeiträumen P1 (2011-2040), P2 (2041-2070) und P3 (2071-2100) gegenüber C20 für die Anbaugebiete in Rheinland-Pfalz (Mittel aus 5 RCMs; Fehlerbalken = 95 %-Konfidenzintervalle; Differenzen zwischen Szenarien (P1, P2, P3) und C20-Lauf signifikant ($p < 0.05$) außer für P1 gegenüber C20 im März, April, Mai, Juni und Dezember).

Das langjährige Jahresmittel (1971-2000) der Niederschlagshöhe in Rheinland-Pfalz beträgt 720 mm. Die beobachteten Niederschläge stimmen im Jahresverlauf sehr gut mit den C20-Läufen überein (Tab. 13). Die geringsten Niederschläge fallen im Winter (C20 = 164.2 mm), die höchsten, konvektiv beeinflussten Niederschlagsmengen liegen mit 204.9 mm im Sommer (Abb. 11). In den Szenarien nimmt die Jahressumme der Niederschlagshöhe geringfügig ab (P3-C20 = -12.8 mm; nicht signifikant). Im Jahresverlauf ergeben sich jedoch einige Unterschiede. In erster Linie besteht eine Tendenz zu geringeren Niederschlagshöhen in den Monaten Mai-September (P3-C20 = -50.5 mm, nicht signifikant), woran der Juli und August den stärksten Anteil haben. In allen anderen Monaten sind vornehmlich Niederschlagszunahmen zu erwarten, wobei im Winter (P3-C20 = +24.0 mm; signifikant bei $p < 0.05$) der stärkste Anstieg zu erkennen ist. In den polnischen Anbaugebieten fallen im Jahresmittel rund 35 % weniger Niederschläge als in Rheinlandpfalz (C20 = 471.7 mm). Die Abweichungen zu den Beobachtungen sind jedoch beträchtlich (OBS = 525 mm; Tab. A2). In der Jahressumme kann hier hingegen mit 38.4 mm (P3-C20) mehr Niederschlag gerechnet werden, wobei sich in den Wintermonaten (P3-C20 = +47.9 mm) eine Zunahme und in den Sommermonaten (P3-C20 = -41.9 mm) eine annähernd gleiche Abnahme zeigt (signifikant bei $p < 0.05$; Abb. A4).

In Michigan sind die Niederschlagsmengen deutlich höher als in den europäischen Anbaugebieten (C20 = Eau Claire: 908 mm, Hart: 920 mm, Maple City: 903 mm; Tab. A2). Hier ist der Herbst die niederschlagsreichste Jahreszeit, gefolgt vom Sommer. Im Winter fallen die geringsten Niederschläge, welche hauptsächlich in Form von Schnee auftreten. Im Laufe dieses Jahrhunderts kann eine Abnahme der Sommerniederschlagshöhe erwartet werden, jedoch nimmt der Niederschlag in den anderen Monaten zu, sodass insgesamt mit einer höheren Jahressumme zu rechnen ist (P2-C20 = Eau Claire: +14.9 mm, Hart: +49.3 mm, Maple City: +80.5 mm, nicht signifikant; Abb. A4-5).

Tab. 13: Monats- und Jahresmittel der beobachteten (OBS) und modellierten (C20) Niederschlagshöhe (mm) im Zeitraum 1971-2000 für die Anbauregion Rheinland-Pfalz.

	Monat												Jahr
	Jan.	Feb.	Mär.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	
OBS	53.2	43.8	53.8	49.6	65.1	72.2	78.5	56.5	59.7	61.0	61.8	64.5	720
C20	54.0	46.1	54.8	50.3	63.0	67.3	74.2	63.5	61.8	58.2	62.5	64.2	720

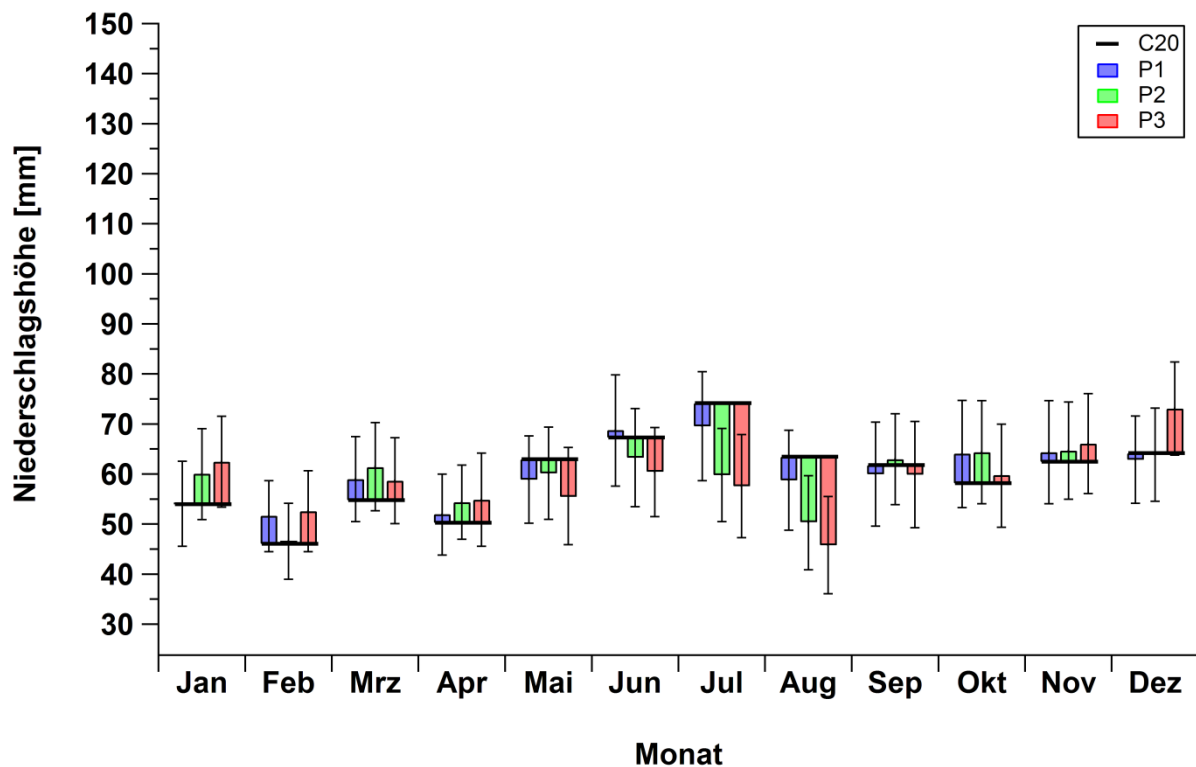


Abb. 11: Mittelwerte der Monatssummen der Niederschlagshöhe im Kontrolllauf (C20: 1971-2000) und Differenz zwischen den Zeiträumen P1 (2011-2040), P2 (2041-2070) und P3 (2071-2100) gegenüber C20 für die Anbaugelände in Rheinland-Pfalz (Mittel aus 5 RCMs; Fehlerbalken = 95 %-Konfidenzintervalle; Differenzen zwischen Szenarien (P1, P2, P3) und C20-Lauf nicht signifikant ($p < 0.05$), außer für P2 gegenüber C20 im Juli, und August, sowie für P2 gegenüber C20 im Juli).

Zusammenfassend kann man sagen, dass auf der Grundlage der verwendeten regionalen Klimamodelle (SRES-Szenario A1B) die Lufttemperatur im Laufe dieses Jahrhunderts in den untersuchten Anbauregionen signifikant zunehmen wird. Der für die Entwicklung von Sauerkirchgehölzen relevante Zeitraum von April bis Juli zeigt eine höhere Temperaturzunahme in Michigan als in den europäischen Anbaugeländen (P2-C20). Im Jahresmittel nimmt die Niederschlagshöhe in allen Anbauregionen, außer in Rheinland-Pfalz, zu (P2-C20, nicht signifikant). Im Jahresverlauf ergeben sich dabei einige Unterschiede. Für den Sommer wurde eine signifikante Abnahme und im Winter eine signifikante Zunahme der Niederschlagshöhe berechnet (nicht signifikant im Winter in Rheinland-Pfalz).

6.3 Klimatische Indikatoren

6.3.1 Bivariate Häufigkeitsverteilung von Lufttemperatur und Niederschlagshöhe

Klimatische Faktoren beeinflussen das Wachstum und die Entwicklung von Obstgehölzen. Die Interaktion von Lufttemperatur und Niederschlagshöhe in den Monaten von April bis Juli spielt eine entscheidende Rolle in der Ertragsbildung von Sauerkirschgehölzen. Deswegen wurden für diesen Zeitraum Konturdiagramme der Lufttemperatur und Niederschlagshöhe erstellt (Abb. 12). Vergleicht man den Kontrolllauf mit den Zeitscheiben, kann für dieses Jahrhundert ein deutlicher Anstieg der Lufttemperatur in den deutschen Anbaugebieten beobachtet werden. Hierbei liegt die maximale Häufigkeit im Kontrolllauf bei 16 °C und verschiebt sich auf 18 °C (P1), 19 °C (P2) und 21 °C (P3) in den drei untersuchten Zeitabschnitten (Abb. 12). Die absolute Häufigkeit der Klasse > 0-1 mm Niederschlagshöhe nimmt in den Szenarien zu, während sie für die Klassen > 1 mm abnimmt, sodass in Zukunft im Zeitraum von April bis Juli eine insgesamt geringere Niederschlagshöhe erwartet werden kann. Die polnischen Anbaugebiete zeigen einen ähnlichen Kurvenverlauf (Abb. A6).

In Michigan hingegen ist für den Zeitraum P2 ebenfalls ein Anstieg der Lufttemperaturen zu erwarten, doch zeigen die Abbildungen A6-7 keine eindeutigen Veränderungen in der Niederschlagshöhe. Der Trend beider Parameter ist mit den Forschungsergebnissen anderer Autoren für Mitteleuropa und Michigan vergleichbar (Christensen und Christensen 2007, Goergen et al. 2013, Hayhoe 2008, Van der Linden und Mitchell 2009).

Zu berücksichtigen ist, dass in den Abbildungen zwei modellierte Parameter mit unterschiedlich hohem Unsicherheitsgrad verwendet wurden. Bei Simulationen der Niederschlagshöhe gibt es zumeist größere Unsicherheiten als bei den Temperaturen (IPCC 2013). Außerdem korrelieren diese Parameter in den Modellen manchmal stark, und somit werden warme Sommer oft auch als trockene Sommer simuliert (Déqué und Somot 2010, Hirschi et al. 2011, Trenberth und Shea 2005).

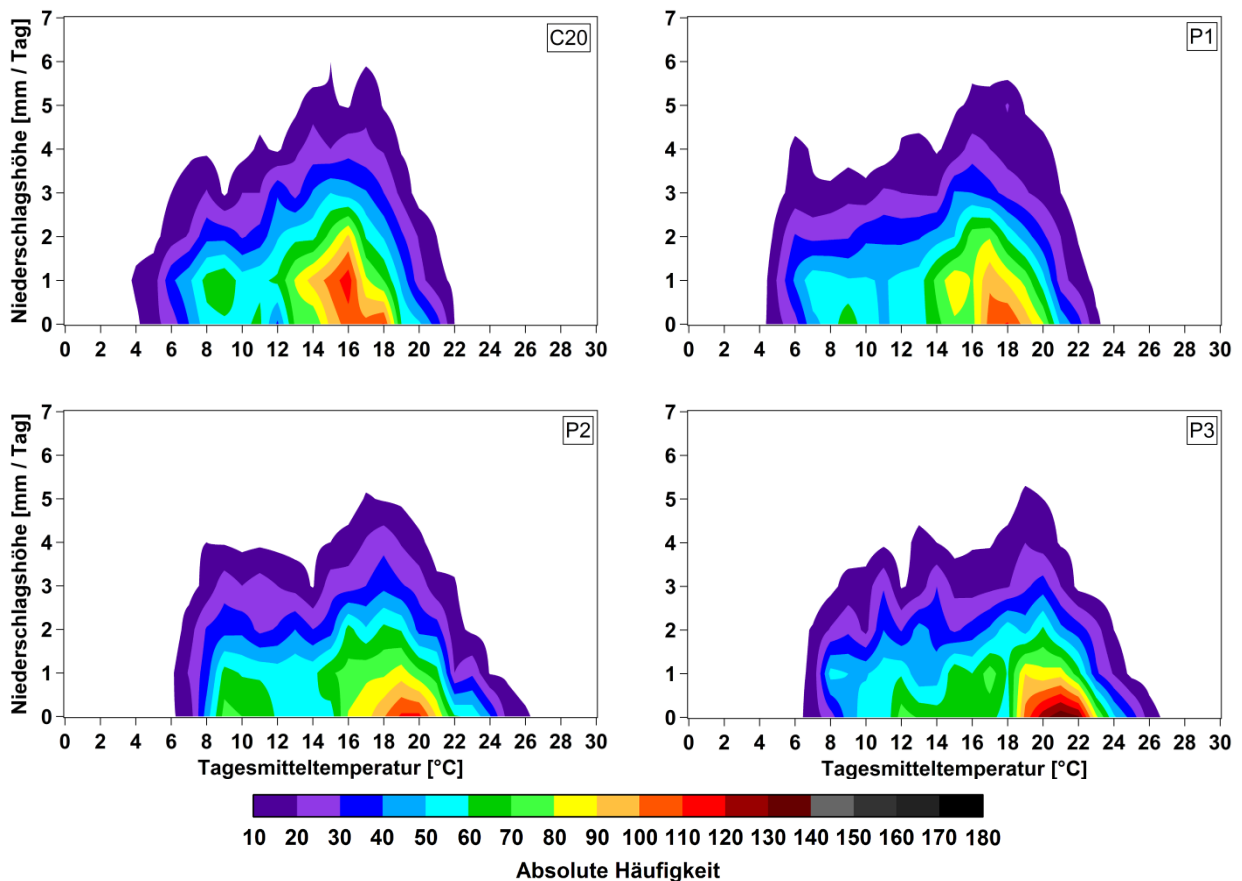


Abb. 12: Bivariate Häufigkeitsverteilung der Tagesmitteltemperatur und der täglichen Niederschlags-
höhe für den Zeitraum April bis Juli in Rheinland-Pfalz (Kontrolllauf (C20) = 1971-2000, Szenarien:
P1 = 2011-2040, P2 = 2041-2070, P3 = 2071-2100; Mittel aus 5 RCMs).

6.3.2 Standardized Precipitation Index (SPI)

Sauerkirschgehölze werden meist auf schwachwachsenden Unterlagen kultiviert. Um einen hohen Ertrag bei guter Fruchtqualität zu gewährleisten, muss eine ausreichende Wasserverfügbarkeit gegeben sein. Deswegen wurden Veränderungen der Trockenheits- und Feuchtigkeitsbedingungen im Zuge des Klimawandels mit dem Standardized Precipitation Index untersucht. Die Ergebnisse für Rheinland-Pfalz sind in Abbildung 13 dargestellt. Die Anzahl von Jahren der *SPI*-Klassen „extrem zu feucht“ (EF) und „extrem zu trocken“ (ET) haben eine relativ gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen (C20 gegenüber OBS), während es bei der Klasse „mäßig bis deutlich zu feucht“ (MDF) größere Abweichungen gibt. Im Laufe dieses Jahrhunderts ist mit einer Zunahme der trockenen Jahre und einer Abnahme der MDF-Jahre zu rechnen. Die EF Jahre bleiben hingegen unverändert. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die mittlere Niederschlagshöhe im Zeitraum von April bis Juli nur von 255 mm im Kontrolllauf (C20) auf 230 mm im Zeitabschnitt P3 abgenommen hat, jedoch die

Anzahl von mäßig bis deutlich zu trockenen (MST) und ET Jahren von 5 auf 11 Jahre gestiegen ist. In Polen ist eine ähnliche Situation zu erwarten, wobei hier für die Monate von April bis Juli der näheren Zukunft (P1) die höchste Anzahl von trockenen Jahren berechnet wurde (Abb. A8). In den Monaten August und September steigt die Anzahl von Jahren mit ET um ein siebenfaches (Zeitabschnitt P3 gegenüber Kontrolllauf C20). Der Klimawandel könnte in Europa zu einer Nordwärtsverschiebung der mediterranen Klimazone führen und damit Mitteleuropa bis zum Ende dieses Jahrhunderts mehr Jahre mit warmen und trockenen Sommern, sowie feuchten Wintern bringen (Seneviratne et al. 2006).

Michigan hat im C20-Lauf eine ähnliche Anzahl von trockenen und feuchten Jahren wie die europäischen Anbauggebiete. In Eau Claire wird in den Monaten August bis September eine Zunahme der ET-Jahre von 0.5 (C20) auf 2.0 (P2) und der MST von 4.3 (C20) auf 7.0 (P2) erwartet (Abb. A8). Die Anbauregionen Hart und Maple City zeigen hingegen nur geringe Veränderungen in den Szenarien (Abb. A8-9). Christensen et al. (2007) haben 21 globale Klimamodelle (GCM) verwendet, um den Niederschlag im mittleren Westen der USA für den Zeitraum 2080-2099 zu untersuchen. Für Michigan zeigt der Mittelwert des Ensembles gleichbleibende Niederschlagssummen im Sommer (Juni, Juli, August). Dabei berechnete die Hälfte der 21 GCM eine Zunahme und die andere Hälfte eine Abnahme der Niederschlagshöhe.

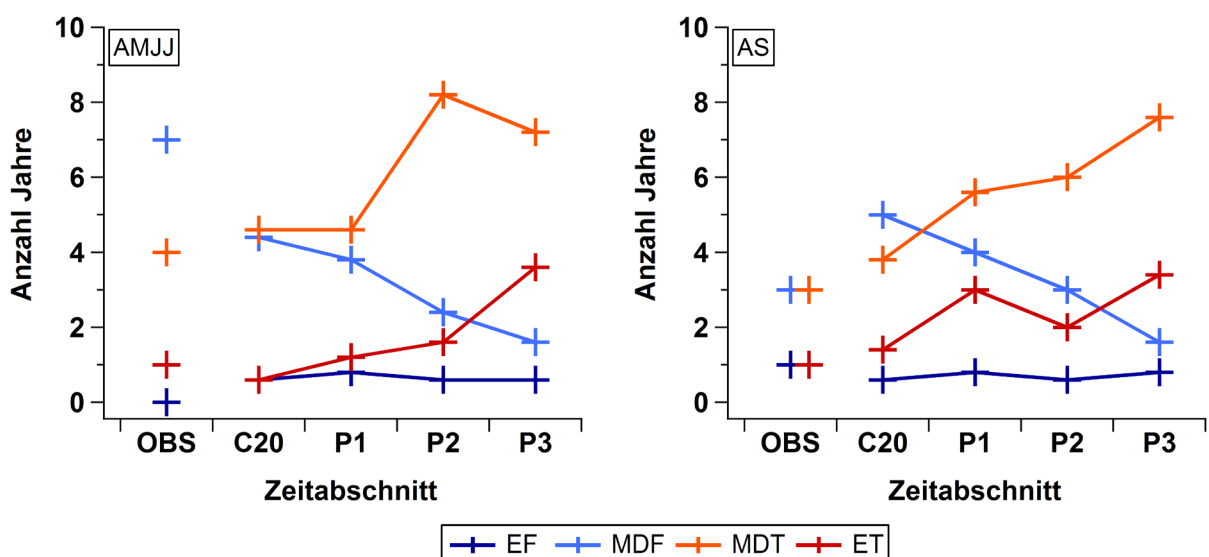


Abb. 13: Trockenheits- und Feuchtigkeitsbedingungen (*SPI* Klassen: EF = extrem zu feucht; MDF = mäßig bis deutlich zu feucht; MST = mäßig bis deutlich zu trocken; ET = extrem zu trocken) für die Monate von April bis Juli (AMJJ) und August bis September (AS) in Rheinland-Pfalz (Beobachtungen (OBS) = 1971-2000; Kontrolllauf (C20) = 1971-2000, Szenarien: P1 = 2011-2040, P2 = 2041-2070, P3 = 2071-2100; Mittel aus 5 RCMs).

Die Verfügbarkeit von Wasser für das Wachstum und die Entwicklung von Obstgehölzen hängt nicht nur von der jährlichen Höhe und Verteilung der Niederschläge ab, sondern ebenso von den physikalischen Fähigkeiten des Bodens, Wasser zu speichern, den klimatischen Verhältnissen, die die Verdunstung des Bestandes steuern und letztendlich vom Wasserbedarf der Nutzpflanzen selbst (Chmielewski 2011a). Sauerkirschgehölze werden vorwiegend auf leichten Böden (Sandböden, lehmige Sandböden) mit geringem Wasserspeichervermögen angebaut. In den europäischen Anbaugebieten, in denen die Anzahl von trockenen Jahren im Laufe dieses Jahrhunderts zunehmen wird, könnte es deswegen wirtschaftlich rentabel sein, eine Zusatzbewässerung zur Erhöhung und Stabilisierung der Erträge zu verwenden.

6.3.3 Trockenperioden

Lang anhaltende Trockenheit während des Entwicklungs- und Ertragsbildungszeitraums führt bei Obstgehölzen zu einer Einschränkung der Transpiration und in der Regel zu einer Verminderung der Stoffproduktion. Dies ist im Sauerkirschanbau mit Ertragseinbußen verbunden. Im Laufe dieses Jahrhunderts ist in Rheinland-Pfalz mit einer signifikanten Abnahme von Niederschlagstagen ($P > 1 \text{ mm}$) im Zeitraum von April bis Juli zu rechnen ($P3\text{-}C20 = -4.4$ Tage; Tab. 14). Die mittlere Anzahl siebentägiger Trockenperioden (TP_7) beträgt im Kontrolllauf 2.4 und könnte bis Ende dieses Jahrhunderts geringfügig steigen ($P3\text{-}C20 = +0.6$, signifikant bei $p < 0.05$; Abb. 14). Damit erhöht sich in Zukunft die Gefahr von Trockenstress für Sauerkirschgehölze.

Die anderen Anbauregionen wiesen unter heutigen Bedingungen (C20) eine geringere Anzahl von Niederschlagstagen auf (Tab. 14) und hatten etwas höhere Werte für siebentägige Trockenperioden (TP_7) als Rheinland-Pfalz ($C20 = \text{Polen: } 3.6, \text{ Michigan: } \sim 3.8$). Jedoch zeigten beide Parameter keine signifikanten Veränderungen in den Szenarien (Tab. 14; Abb. A10-11). Bei allen verwendeten RCM wurden zu viele Niederschlagstage, sowie eine zu geringe Anzahl von siebentägigen Trockenperioden (TP_7) im Vergleich zu den Beobachtungen modelliert. Die anderen untersuchten Trockenperioden treten im Kontrolllauf (C20), sowie in den Szenarien nur selten auf. Eine 14-tägige Trockenperiode (TP_{14}) kommt durchschnittlich einmal im Jahr, bzw. einmal alle zwei Jahre vor, während eine 21-tägige Trockenperiode (TP_{21}) nur einmal alle 10 Jahre auftritt (außer in Polen; Abb. A10).

Untersuchungen von Schoof et al. (2010) zeigen eine deutlichere Abnahme der Niederschlagstage in Michigan im Vergleich zu dieser Studie, jedoch wurden diese für den

Zeitraum Juni-August berechnet. Wagner et al. (2012) haben sieben regionale Klimamodelle (RCM) verwendet, um die Anzahl von 5-tägigen Trockenperioden (TP_5) in Deutschland zu untersuchen. In Rheinland-Pfalz wird eine 5 % Zunahme der jährlichen TP_5 für den Zeitraum 2021-2050 angenommen. Dabei hatten vier RCM eine höhere Anzahl von TP_5 , während drei RCM eine Abnahme berechneten.

Tab. 14: Mittlere Anzahl von Niederschlagstagen ($P > 1$ mm) im Zeitraum April-Juli in den untersuchten Anbaugebieten (Beobachtungen (OBS) = 1971-2000; Kontrolllauf (C20) = 1971-2000, Szenarien: P1 = 2011-2040, P2 = 2041-2070, P3 = 2071-2100; Mittel aus 5 RCMs in Deutschland, 6 RCMs in Polen und 4 RCMs in Michigan; $\pm x$ = 95 %-Konfidenzintervalle; Differenzen zwischen Szenarien (P1, P2, P3) und C20-Lauf nicht signifikant ($p < 0.05$), außer für P3 gegenüber C20 in Rheinland-Pfalz).

Anbauregion	OBS	C20	P1	P2	P3
Rheinland-Pfalz (DEU)	44.9 \pm 2.8	48.2 \pm 3.1	46.8 \pm 3.0	45.1 \pm 3.2	43.8 \pm 2.8
Przybroda (POL)	30.8 \pm 2.5	38.8 \pm 3.0	38.3 \pm 2.6	38.5 \pm 2.7	37.3 \pm 3.5
Eau Claire (USA)	34.9 \pm 1.9	36.1 \pm 2.4	-	34.6 \pm 2.2	-
Hart (USA)	31.2 \pm 2.3	33.5 \pm 2.7	-	31.8 \pm 2.2	-
Maple City (USA)	32.3 \pm 2.7	35.1 \pm 2.4	-	34.6 \pm 2.2	-

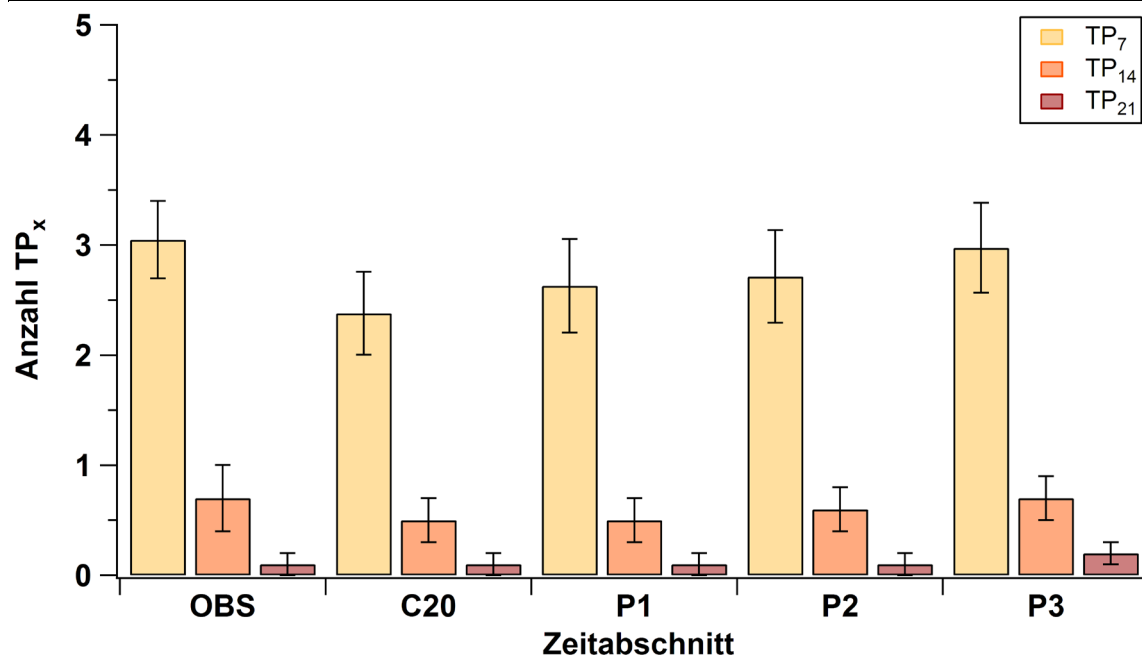


Abb. 14: Anzahl der Trockenperioden (TP_7 = mindestens 7 aufeinanderfolgende Tage ohne Niederschlagstag ($P > 1$ mm); TP_{14} = 14 Tage; TP_{21} = 21 Tage) im Zeitraum April-Juli in Rheinland-Pfalz (Beobachtungen (OBS) = 1971-2000; Kontrolllauf (C20) = 1971-2000, Szenarien: P1 = 2011-2040, P2 = 2041-2070, P3 = 2071-2100; Mittel aus 5 RCMs; Fehlerbalken = 95 %-Konfidenzintervalle; Differenzen zwischen Szenarien (P1, P2, P3) und C20-Lauf nicht signifikant ($p < 0.05$), außer für siebentägigen Trockenperioden zwischen P3 und C20).

6.3.4 Hohe Temperaturen während des Fruchtwachstums und der Blütendifferenzierung der Knospen

Wie bereits aus der deutlichen Zunahme der Lufttemperaturen in den untersuchten Anbaugebieten hervorgeht, wird die Anzahl von heißen Tagen ($T_x > 30\text{ °C}$) in Zukunft signifikant steigen. Während in Rheinland-Pfalz im Kontrolllauf (C20) jährlich nur 5.7 heiße Tage im Zeitraum April-Juli und 3.9 Tage in den Monaten August-September auftreten, kann im Zeitabschnitt P3 mit einem vierfachen Wert gerechnet werden (Tab. 15). In Polen gibt es eine ähnliche Anzahl von Tagen mit Temperaturen über 30 °C im C20-Lauf wie in Rheinland-Pfalz, doch ist der Anstieg bis zum Ende dieses Jahrhunderts nicht so stark (P3-C20= April-Juli: +7.3 Tage; August-September: +5.0 Tage, signifikant bei $p < 0.05$).

In Michigan hingegen tritt schon unter heutigen Bedingungen eine höhere Anzahl von heißen Tagen als in Mitteleuropa auf (Tab. 15). Hier würde man eigentlich einen Nord-Süd Gradienten erwarten, doch hat das nördlichste Anbaugebiet (Maple City) mehr heiße Tage, als die Region Hart. Der Grund dafür ist die Entfernung der Anbaugebiete zum Michigansee. Die Sauerkirschanbauregion Hart liegt in unmittelbarer Nähe zum See, der einen kühlenden Effekt im Sommer hat, weshalb weniger heiße Tage auftreten. Im Laufe dieses Jahrhundert kann in allen drei untersuchten Regionen von Michigan mit einer signifikanten Zunahme der Anzahl von Tagen mit Temperaturen über 30 °C gerechnet werden.

Die steigende Anzahl von heißen Tagen in diesem Jahrhundert könnte in den untersuchten Anbauregionen zu einer vorzeitigen Reife der Sauerkirschen führen. Die durch Hitze und Trockenheit eingeleitete Notreife ist meist mit deutlichen Ertragsreduktionen verbunden. Wie bereits erwähnt werden Sauerkirschen vorwiegend auf leichten Böden, mit geringem Wasserspeichervermögen angebaut. Hohe Temperaturen und starke Sonneneinstrahlung fördern die Verdunstung des Bodenwassers und infolge dessen steigt die Gefahr von Trockenstress. Die untersuchten Anbauregionen könnten aber auch vom bevorstehenden Temperaturanstieg profitieren. Höhere Temperaturen während des Entwicklungs- und Ertragsbildungszeitraums steigern bei ausreichender Wasserverfügbarkeit die Produktivität von Obstgehölzen.

Tab. 15: Mittlere Anzahl heißer Tage ($T_x > 30\text{ °C}$) im Zeitraum April-Juli (Tab. 15a) und August-September (Tab. 15b) in den untersuchten Anbauregionen (Beobachtungen (OBS) = 1971-2000; Kontrolllauf (C20) = 1971-2000, Szenarien: P1 = 2011-2040, P2 = 2041-2070, P3 = 2071-2100; Mittel aus 5 RCMs in Deutschland, 6 RCMs in Polen und 4 RCMs in Michigan; $\pm x$ = 95 %-Konfidenzintervalle; Differenzen zwischen Szenarien (P1, P2, P3) und C20-Lauf signifikant ($p < 0.05$), außer für P1 gegenüber C20 in Przybroda).

Tab. 15a

Anbauregion	OBS	C20	P1	P2	P3
Rheinland-Pfalz (DEU)	4.4±1.6	5.7±1.6	9.0±2.0	15.1±3.3	20.0±3.1
Przybroda (POL)	4.4±1.5	3.5±1.4	6.0±1.9	7.6±2.3	10.8±2.8
Eau Claire (USA)	18.1±3.0	14.9±2.9	-	28.4±4.1	-
Hart (USA)	6.6±1.8	4.8±2.0	-	16.1±3.5	-
Maple City (USA)	11.4±2.7	9.2±2.2	-	20.3±3.8	-

Tab. 15b

Anbauregion	OBS	C20	P1	P2	P3
Rheinland-Pfalz (DEU)	2.7±0.9	3.9±1.3	6.2±1.6	11.4±2.5	17.8±2.8
Przybroda (POL)	2.5±1.1	2.2±1.0	3.7±1.5	5.8±1.8	7.2±1.9
Eau Claire (USA)	8.1±2.0	10.4±2.6	-	21.4±3.3	-
Hart (USA)	2.5±1.0	3.0±1.3	-	10.5±2.9	-
Maple City (USA)	4.3±1.5	5.0±1.3	-	16.6±2.7	-

6.3.5 Temperaturverhältnisse in der Blütezeit

Um zu beurteilen ob sich das Flugverhalten der zur Befruchtung von Sauerkirschgehölzen notwendigen Bienen durch den Klimawandel verändert, wurden die Temperaturverhältnisse in der Blütezeit untersucht. In Rheinland-Pfalz hat sich die Blütezeit von 14.3 Tage im C20-Lauf auf 15.1 Tage im Zeitabschnitt P3 verlängert, während die mittlere Anzahl von Stunden zwischen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang im selben Zeitraum hingegen abgenommen hat (C20 = 198 h; P3 = 190 h; Tab. 16). Grund dafür ist das frühere Eintreten des Blühbeginns in den Szenarien, wodurch sich die Tageslängen in der Blütezeit verkürzen (detaillierte Ergebnisse über Veränderungen in der Phänologie werden im Abschnitt 6.4 beschrieben). Bis zum Ende des Jahrhunderts besteht die Möglichkeit, dass optimale Temperaturverhältnisse ($T > 18.3\text{ °C}$; FI_3) zur Futtersuche der Bienen um 25 % abnehmen können, während sich die Anzahl der Stunden im Temperaturbereich zwischen 12.8 und 18.3 °C nicht verändern.

Untersuchungen im nahegelegenen Bundesland Hessen haben eine Abnahme der Bienenflugintensität von 6 % (Differenz: 1971-2000 und 2071-2100) ergeben. Hier wurde aber ein komplexeres Modell mit mehreren meteorologischen Parametern verwendet (Blümel und Chmielewski 2013).

Die Ergebnisse des polnischen Anbaugebiets zeigen ähnliche Werte und Veränderungen in den Szenarien, wobei es hier eine Abnahme der FI_3 von 55 Stunden (C20) auf 41 Stunden (P3) geben kann (Tab. A3). In Michigan ist die Anzahl von Stunden in FI_1 und FI_2 geringer als in den europäischen Anbaugebieten, doch liegen die Werte in FI_3 bereits im C20 bei 60 h in Hart, 69 h in Eau Claire und 73 h in Maple City. In Zukunft werden hier aber keine Veränderungen erwartet (Tab. A3).

Tab. 16: Mittlere Blühdauer, mittlere Anzahl Stunden von Sonnenaufgang (SA) bis Sonnenuntergang (SU) in der Blütezeit (N_{SA-SU}), mittlere Anzahl von Stunden mit Temperaturen im Bereich von $\geq 12.8-15.6$ °C (N_{FI1}), $> 15.6-18.3$ °C (N_{FI2}) und über > 18.3 °C (N_{FI3}) der Sauerkirsche in Rheinland-Pfalz (Beobachtungen (OBS) = 1971-2000; Kontrolllauf (C20) = 1971-2000, Szenarien: P1 = 2011-2040, P2 = 2041-2070, P3 = 2071-2100; Mittel aus 5 RCMs; $\pm x$ = 95 %-Konfidenzintervalle; Differenzen zwischen Szenarien (P1, P2, P3) und C20-Lauf nicht signifikant ($p < 0.05$), außer für die Blühdauer.

Parameter	OBS	C20	P1	P2	P3
Blühdauer [Tage]	15.2 \pm 0.9	14.3 \pm 0.9	14.9 \pm 1.0	15.1 \pm 0.9	15.1 \pm 0.8
N_{SA-SU} [Stunden]	207 \pm 11	198 \pm 12	202 \pm 13	197 \pm 12	190 \pm 10
N_{FI1} [Stunden]	40 \pm 4	43 \pm 6	43 \pm 6	41 \pm 5	41 \pm 5
N_{FI2} [Stunden]	29 \pm 5	30 \pm 4	29 \pm 4	28 \pm 4	28 \pm 4
N_{FI3} [Stunden]	37 \pm 10	40 \pm 9	36 \pm 9	32 \pm 8	29 \pm 7

6.4 Veränderungen in der Phänologie

Der in Zukunft zu erwartende deutliche Anstieg der Lufttemperatur könnte zu Veränderungen in den phänologischen Eintrittsterminen und im Zeitpunkt der Dormanzbrechung führen. Wird der winterliche Kältereiz hingegen unzureichend erfüllt, ist ein verspäteter und unregelmäßiger Blühbeginn die Folge. Ein daraus resultierender längerer Blühzeitraum kann einen verstärkten Knospenabwurf verursachen (Erez 2000, Legave et al. 1982). Dies kann dann zu einer ungleichmäßigen Fruchtreife führen und ist im Sauerkirschanbau mit höheren Erntekosten, sowie Ertragseinbußen verbunden (Couvillon 1995). Deswegen wurde das Ende der Dormanz (t_l) für Sauerkirschgehölze mit dem in Abschnitt 5.3.2 beschriebenen Modell

M4DL berechnet, welches ein Kältebedürfnis von 74 Chilling-Portions (CP) voraussetzt. Im Mittel wurde die Dormanz in Rheinland-Pfalz am 17. Januar (C20) gebrochen (Tab. 17). Bis 2100 kann im Mittel mit einer Verspätung von t_l um 10 Tage gerechnet werden. Chmielewski et al. (2012b) haben drei verschiedenen Chilling-Modelle zur Berechnung des winterlichen Kältereizes in Deutschland verwendet. Demnach ist das Ende der Winterruhe stark vom Kältebedürfnis der Gehölze abhängig. Für Kulturen mit einem geringen Kältebedarf (39-61 CP) verspätet sich das Ende der Dormanz im Laufe dieses Jahrhundert im deutschen Flächenmittel, für Arten mit einem mittleren Bedarf (67-78 CP) ergeben sich nur geringe Veränderungen und für Obstarten mit einem hohen Kältebedürfnis (83-100 CP) verfrüht sich das Ende der Winterruhe zunehmend.

In Polen ist das Kältebedürfnis von Sauerkirschgehölzen unter heutigen Bedingungen am 24. Januar (C20) erfüllt, doch wird hier für die Zukunft eine geringe Verfrühung ($P3-C20 = -4$ Tage; Tab. 17) erwartet. Im Vergleich zu den europäischen Anbaugebieten wird die Dormanz in Michigan hingegen zu einem deutlich späteren Termin gebrochen (C20: 5. März; Tab. 17). In den untersuchten Anbauregionen wurde in allen Jahren das spezifische Kältebedürfnis für Sauerkirschen nach Modell M4DL erfüllt. Daher sollte sich auch hier die Gefahr einer Nichterfüllung des Kältereizes und daraus resultierenden Ertragsschäden bis Mitte dieses Jahrhunderts nicht merklich vergrößern.

Tab. 17: Mit Modell M4DL berechnetes Ende der Dormanz (t_l) der Sauerkirsche in den untersuchten Anbaugebieten (Beobachtungen (OBS) = berechnet aus beobachteten Lufttemperaturen im Zeitraum 1971-2000; Kontrolllauf (C20) = 1971-2000, Szenarien: P1 = 2011-2040, P2 = 2041-2070, P3 = 2071-2100; Mittel aus 5 RCMs in Deutschland, 6 RCMs in Polen und 4 RCMs in Michigan; $\pm x = 95\%$ -Konfidenzintervalle; Differenzen zwischen Szenarien (P1, P2, P3) und C20-Lauf nicht signifikant ($p < 0.05$), außer für P3 gegenüber C20 in Rheinland-Pfalz).

Anbauregion	OBS	C20	P1	P2	P3
Rheinland-Pfalz (DEU)	17/01(± 3.5)	17/01(± 4.3)	19/01(± 3.8)	20/01(± 2.8)	27/01(± 3.0)
Przybroda (POL)	27/01(± 6.8)	24/01(± 6.4)	21/01(± 6.1)	22/01(± 5.5)	20/01(± 3.5)
Eau Claire (USA)	28/02(± 5.1)	05/03(± 4.5)	-	07/03(± 4.6)	-
Hart (USA)	26/02(± 5.2)	05/03(± 5.1)	-	01/03(± 4.5)	-
Maple City (USA)	28/02(± 5.0)	05/03(± 4.6)	-	05/03(± 4.3)	-

Der Klimawandel führt in allen Anbaugebieten zu signifikanten Veränderungen der Frühjahrs-Phänologie (Abb. 15). Im Mittel beginnen Sauerkirschgehölze in Rheinland-Pfalz am 6. April

(C20) mit ersten sichtbaren Veränderungen an den Knospen (Side green, SG). Bis zum Ende dieses Jahrhunderts kann sich dieser Termin um 11 Tage verfrühen (signifikant bei $p < 0.05$). Das darauffolgende phänologische Stadium (Green tip, GT) tritt im Kontrolllauf (C20), aber auch in den künftigen Zeitabschnitten ca. 6 Tage später auf. Auch bei den anderen Stadien [Tight cluster (TC), Open cluster (OC), First White (FW), Blühbeginn (BB) und Blühende (BE)] haben sich Verfrühungen der Eintrittstermine, jedoch keine Veränderungen in der Länge der phänologischen Phasen ergeben. Der Zeitraum zwischen SG und BE verkürzt sich signifikant von 31.8 Tage im Kontrolllauf (C20) auf 30.0 Tage im Zeitabschnitt P3.

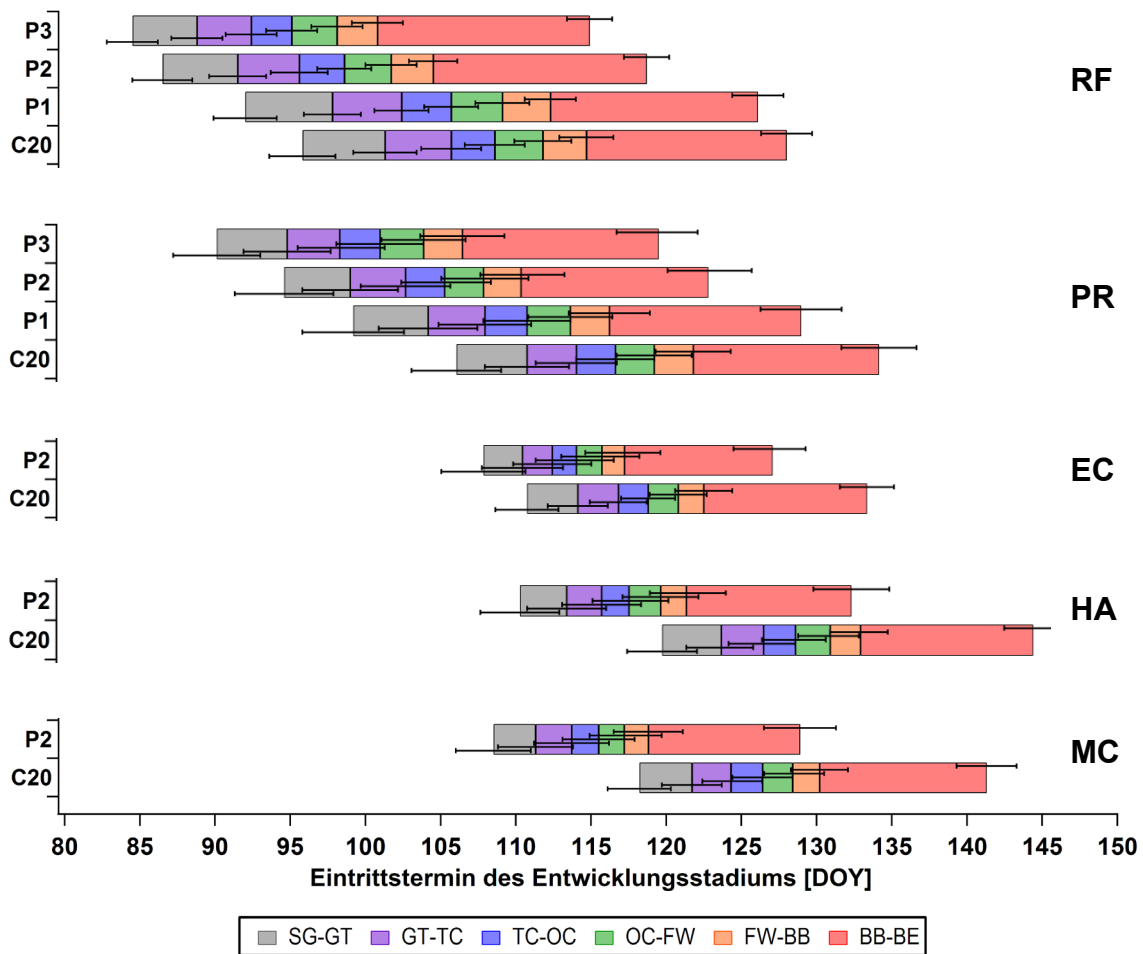


Fig. 15: Mittlere Eintrittstermine und Länge der phänologischen Phasen der Sauerkirsche in den untersuchten Anbaugebieten (RF = Rheinland-Pfalz, PR = Przybroda, EC = Eau Claire, HA = Hart, MC = Maple City; SG = Side green, GT = Green tip, TC = Tight cluster, OC = Open cluster, FW = First white, BB = Blühbeginn, BE = Blühende; Kontrolllauf (C20) = 1971-2000, Szenarien: P1 = 2011-2040, P2 = 2041-2070, P3 = 2071-2100; Mittel aus 5 RCMs in Deutschland, 6 RCMs in Polen und 4 RCMs in Michigan; Fehlerbalken = 95 %-Konfidenzintervalle; Differenzen der Eintrittstermine zwischen Szenarien (P1, P2, P3) und C20-Lauf signifikant ($p < 0.05$); Differenzen der Länge der phänologischen Phasen nicht signifikant, außer für SG-GT, BB-BE, SG-BE in Rheinland-Pfalz, Eau Claire und Maple City).

In Polen hat die Sauerkirsche im C20-Lauf am 16. April mit der Entwicklung (SG) begonnen. Auch hier kann man für die Zukunft eine signifikante Verfrühung der Eintrittstermine ($P3-C20 = -16$ Tage), jedoch keine Veränderungen in der Länge der phänologischen Phasen erwarten. Im Vergleich zu Deutschland besteht eine höhere Variabilität der phänologischen Eintrittstermine. Während sich in Polen die 95 %-Konfidenzintervalle auf ca. ± 3 Tage belaufen, sind sie in Rheinland-Pfalz nur ca. ± 2 Tage.

Aufgrund der klimatischen Unterschiede zwischen den europäischen und nordamerikanischen Anbaugebieten beginnt die Entwicklung der Sauerkirschgehölze in Michigan schon unter heutigen Bedingungen später. Im Mittel wurde das Stadium SG in Eau Claire am 21. April (C20), in Hart am 30. April (C20) und in Maple City am 28. April (C20) erreicht. Für Eau Claire werden bis Mitte dieses Jahrhunderts nur geringe Veränderungen der phänologischen Eintrittstermine erwartet ($P2-C20 = -3$ Tage), während in den anderen beiden Anbaugebieten eine Verfrühung von ca. 10 Tagen auftreten kann. Der Zeitraum zwischen SG und BE ist im C20-Lauf ca. 23 Tage lang und verkürzt sich in der Mitte dieses Jahrhunderts (P2) auf ungefähr 20 Tage.

6.5 Veränderungen in der Gefahr von Spätfrost

Die häufigsten Frostschäden treten nicht im Winter auf, wenn Obstgehölze sich in der Ruhephase befinden und damit größtenteils frostresistent sind, sondern im Frühjahr wenn der Wassergehalt in den Knospen zunimmt. Die Empfindlichkeit der Gehölze gegenüber Frost steigt mit dem Voranschreiten der Entwicklung. Im Laufe dieses Jahrhunderts könnte der zeitigere Vegetationsbeginn zu erhöhtem Spätfrostisiko führen. Deswegen wurde die Frostwahrscheinlichkeit (F_w) für den Zeitraum Side green (SG) bis Pflückreife (PR) untersucht (Tab. 18). In Rheinland-Pfalz fiel die Temperatur in 63 % der untersuchten Jahre mindestens einmal unter den Nullpunkt. Im Vergleich zu den Beobachtungen (OBS) wurde die Frostwahrscheinlichkeit im Kontrolllauf unterschätzt (SG-PR = 55 %), wobei besonders im Zeitraum FW-BE zu geringe Werte auftreten. In den Szenarien zeigte sich zuerst eine Zunahme der Wahrscheinlichkeit von Spätfrost (F_w) für die Zeitscheibe P1 (60 %), um dann in den anderen beiden Zeitabschnitten deutlich abzunehmen (P2 = 42 %, P3 = 33 %). Diese Ergebnisse stehen in Übereinstimmung mit denen von Goergen et al. (2013), die die Anzahl von Frosttagen in den ersten 60 Tagen nach Vegetationsbeginn in Luxembourg untersucht haben. Hierbei wurde ein Trend zu mehr Frostereignissen in der näheren Zukunft (2021-2050) und deutlich weniger in der entfernteren Zukunft (2069-2000) ermittelt.

In den polnischen Anbaugebieten war die Frostwahrscheinlichkeit (F_W) in den Beobachtungen viel höher (SG-PR = 69 %) als im Kontrolllauf (SG-PR = 49 %) und in den drei Zeitscheiben (Tab. 18). Im Gegensatz zu Deutschland nimmt die F_W im Laufe dieses Jahrhunderts jedoch nicht ab.

Tab. 18: Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Spätfrost (F_W) während sieben phänologischen Phasen und dem Zeitraum von SG bis PR in den untersuchten Anbauregionen (RF = Rheinland-Pfalz, PR = Przybroda, EC = Eau Claire, HA = Hart, MC = Maple City; SG = Side green, GT = Green tip, TC = Tight cluster, OC = Open cluster, FW = First white, BB = Blühbeginn, BE = Blühende, PR = Pflückreife; Kontrolllauf (C20) = 1971-2000, Szenarien: P1 = 2011-2040, P2 = 2041-2070, P3 = 2071-2100; Mittel aus 5 RCMs in Deutschland, 6 RCMs in Polen und 4 RCMs in Michigan; $\pm x$ = 95 %-Konfidenzintervalle; Differenzen zwischen Szenarien (P1, P2, P3) und C20-Lauf nicht signifikant ($p < 0.05$), außer für P3 gegenüber C20 in den Zeiträumen SG-GT und SG-PR in Rheinland-Pfalz).

		Phänologische Phasen							
		SG-GT	GT-TC	TC-OC	OC-FW	FW-BB	BB-BE	BE-PR	SG-PR
RF									
	OBS	27±12	14± 8	9± 9	11± 8	20±10	27±15	1± 1	63±14
	C20	26±13	19±12	10± 8	9± 6	7± 7	13±10	2± 2	55±16
	P1	26±12	22±12	17±10	14±10	10±8	14±10	2± 2	60±15
	P2	13±10	10± 9	6± 7	8± 9	6± 6	14±12	3± 3	42±16
	P3	9± 8	7± 6	6± 6	7± 7	3± 3	11± 8	2± 2	33±14
PR									
	OBS	19±16	27±18	27±18	8± 8	19±16	15±14	19±16	69±18
	C20	23±15	11±11	12±11	6± 6	5± 5	12±11	2± 2	49±19
	P1	27±16	22±15	17±13	16±13	11±10	16±13	5± 5	59±18
	P2	21±14	18±14	11±11	9± 9	5± 5	13±11	6± 5	51±18
	P3	20±14	18±14	13±11	11±10	8± 8	15±13	4± 4	52±18
EC									
	OBS	33±18	33±18	10±10	3± 7	0± 0	33±18	13±13	73±16
	C20	25±15	21±14	16±11	9± 9	6± 7	23±12	9± 9	59±16
	P2	14±12	9±10	3± 3	9± 8	9± 5	16±12	8± 7	38±16
HA									
	OBS	50±19	20±15	23±16	20±15	20±15	47±19	10±11	83±14
	C20	27±16	20±14	14±12	11±11	9± 9	27±14	15±13	67±17
	P2	19±14	18±14	8± 8	13±10	11±11	28±15	15±11	63±16
MC									
	OBS	40±18	50±19	40±18	33±18	30±17	63±18	67±18	93± 9
	C20	31±16	20±12	21±14	16±13	9± 9	44±17	35±16	80±13
	P2	23±15	19±13	18±11	14±10	8± 8	30±16	25±15	70±14

In den untersuchten Anbauregionen von Michigan folgt die Anzahl der Jahre mit Temperaturen unter dem Nullpunkt während der Entwicklungsphase einem Nord-Süd Gradienten (Tab. 18). In den Beobachtungen beträgt die Frostwahrscheinlichkeit (F_W) in Eau Claire 73 % (SG-PR) und ist in den nördlicheren Anbaugebieten höher. So wie in Europa wird auch hier die Wahrscheinlichkeit von Spätfrost (F_W) in den Kontrollläufen unterschätzt (C20-OBS = ca. -14 %) und besonders in der Blütezeit treten in allen drei Anbauregionen wesentlich geringere Werte auf (C20-OBS = ca. -20 %). Im Laufe dieses Jahrhunderts kann mit einer Abnahme von Frostereignissen in der Entwicklungszeit (SG-PR) gerechnet werden. Hierbei kann man die stärksten Veränderungen in Eau Claire und Maple City erwarten, während in Hart die Frostwahrscheinlichkeit (F_W) nur geringfügig abnimmt.

Zur Berechnung der Ertragsverluste durch Spätfrost wurden die in Tabelle 8 angeführten kritischen Schadenstemperaturen, sowie die tägliche minimale Lufttemperaturen der untersuchten Anbauregionen verwendet. Tabelle 19 zeigt die berechnete Wahrscheinlichkeit für Frostschäden (F_{WS}) bestimmter Stärke für jeweils 30-jährige Zeiträume für heutige (OBS, C20) und künftige Klimaverhältnisse. In Rheinland-Pfalz zeigte sich, dass unter heutigen Bedingungen lediglich leichte Frostschäden mit bis zu 10 % Ertragsverlust (S_F) in einer nennenswerten Anzahl und Häufigkeit (OBS = 20 %) auftreten, während mittlere (10 - 50 %) und starke (50 - 100 %) Frostschäden in den Beobachtungen mit jeweils nur 3.3 % vertreten sind. Im Laufe dieses Jahrhunderts wird die Wahrscheinlichkeit für Frostschäden voraussichtlich abnehmen. In den polnischen Anbaugebieten sind die Ertragsverluste durch Frost unter heutigen Bedingungen mit denen in Rheinland-Pfalz vergleichbar. Im Zeitabschnitt P1 nimmt die Wahrscheinlichkeit für Frostschäden (F_{WS}) jedoch zu, um dann in der entfernteren Zukunft geringer zu werden. Die leichten und mittleren Frostschäden bleiben in den künftigen Zeitabschnitten jedoch höher als im Kontrolllauf (Tab. 19).

In Michigan gibt es erhebliche Unterschiede in der Wahrscheinlichkeit für Frostschäden (F_{WS}) zwischen den Beobachtungen und den Kontrollläufen (Tab. 19). In Eau Claire wurden die mittleren und starken Frostschäden im Kontrolllauf (C20) überschätzt. Dennoch kann mit einer Abnahme der Wahrscheinlichkeit für Frostschäden (F_{WS}) für den Zeitabschnitt P2 gerechnet werden. In Hart hingegen nehmen die starken Frostschäden bis Mitte dieses Jahrhunderts geringfügig zu, während die anderen beiden Klassen fast unverändert bleiben. In Maple City ist die Wahrscheinlichkeit für starke Frostschäden im Vergleich zu den anderen beiden amerikanischen Standorten außerordentlich groß (OBS = 46.7 %).

Tab. 19: Wahrscheinlichkeiten für leichte ($> 1\%$ - 10%), mittlere ($> 10\%$ - 50%) und starke ($> 50\%$ - 100%) Frostschäden (F_{WS}) im Zeitraum von Side green (SG) bis Pflückreife (PR) in den untersuchten Anbauregionen (RF = Rheinland-Pfalz, PR = Przybroda, EC = Eau Claire, HA = Hart, MC = Maple City; Kontrolllauf (C20) = 1971-2000, Szenarien: P1 = 2011-2040, P2 = 2041-2070, P3 = 2071-2100; Mittel aus 5 RCMs in Deutschland, 6 RCMs in Polen und 4 RCMs in Michigan; $\pm x = 95\%$ -Konfidenzintervalle; Differenzen zwischen Szenarien (P1, P2, P3) und C20-Lauf nicht signifikant ($p < 0.05$), außer für eine Wahrscheinlichkeit für Frostschäden von $> 1\%$ - 10% zwischen P3 und C20 in Rheinland-Pfalz).

Wahrscheinlichkeit für Frostschäden			
	$> 1\% - 10\%$	$> 10\% - 50\%$	$> 50\% - 100\%$
RF			
OBS	20.0 \pm 15.0	3.3 \pm 3.3	3.3 \pm 3.3
C20	26.0 \pm 7.2	2.0 \pm 2.3	1.3 \pm 1.3
P1	19.3 \pm 6.5	1.3 \pm 1.3	0.7 \pm 0.7
P2	11.3 \pm 5.2	1.3 \pm 1.3	0.7 \pm 0.7
P3	6.0 \pm 3.9	3.3 \pm 2.9	0.0 \pm 0.0
PR			
OBS	23.3 \pm 16.5	0.0 \pm 0.0	6.7 \pm 6.7
C20	19.4 \pm 5.9	0.6 \pm 1.1	1.7 \pm 1.7
P1	29.4 \pm 6.8	5.0 \pm 3.3	3.3 \pm 2.7
P2	22.8 \pm 6.3	2.2 \pm 2.2	1.1 \pm 1.1
P3	27.8 \pm 6.7	1.1 \pm 1.1	0.6 \pm 0.6
EC			
OBS	30.0 \pm 17.0	0.0 \pm 0.0	3.3 \pm 3.3
C20	20.0 \pm 7.3	5.8 \pm 4.3	8.3 \pm 5.1
P2	14.2 \pm 6.4	4.2 \pm 3.7	4.2 \pm 3.7
HA			
OBS	46.7 \pm 18.5	10.0 \pm 11.1	3.3 \pm 3.3
C20	24.2 \pm 7.8	7.5 \pm 4.8	13.3 \pm 6.2
P2	20.0 \pm 7.3	6.7 \pm 4.6	16.7 \pm 6.8
MC			
OBS	20.0 \pm 14.9	13.3 \pm 12.6	46.7 \pm 18.5
C20	24.2 \pm 7.8	14.2 \pm 6.4	26.7 \pm 8.1
P2	24.2 \pm 7.8	5.8 \pm 4.3	20.0 \pm 7.3

In Michigan wurden zur Berechnung der möglichen Frostschäden Stationsdaten verwendet. Die Wetterstation von Maple City befindet sich in einer Talsohle und ist von ca. 50 m hohen Erhebungen umgeben. Während Strahlungsfrostereignissen fließt die in Bodennähe gebildete kalte Luft hangabwärts und staut sich im tiefergelegenen Gelände. Hier bilden sich sogenannte Kaltluftseen, in denen die Temperatur auch einige Grad Celsius kälter sein kann

als am Hang und auf den Gipfeln der umliegenden Hügel, wo die Sauerkirschplantagen angesiedelt sind (Poling 2008). Aus diesem Grund wurde die Wahrscheinlichkeit für Frostschäden in Maple City mit modellierten Temperaturen für den Zeitraum 1971-2000 nochmals bestimmt. Dafür wurden die täglichen Beobachtungen der minimalen Lufttemperatur um +1 °C und +2 °C erhöht und zur Berechnung der Frostschäden verwendet. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Abnahme der Wahrscheinlichkeit für starke und mittlere Frostschäden (Tab. 20). Daraus wird ersichtlich, dass das Ausmaß von Frostschäden stark von der Lage der Obstplantagen abhängt.

Tab. 20: Wahrscheinlichkeiten für leichte (> 1 % - 10 %), mittlere (> 10 % - 50 %) und starke (> 50 % - 100 %) Frostschäden (F_{WS}) im Zeitraum von Side green (SG) bis Pflückreife (PR) in Maple City ($OBS_{+1^{\circ}C} = T_n + 1^{\circ}C$ und $OBS_{+2^{\circ}C} = T_n + 2^{\circ}C$; $\pm x = 95\%$ -Konfidenzintervall).

	Wahrscheinlichkeit für Frostschäden		
	> 1 % - 10 %	> 10 % - 50 %	> 50 % - 100 %
$OBS_{+1^{\circ}C}$	46.3±18.4	13.3±12.6	16.7±13.8
$OBS_{+2^{\circ}C}$	43.3±18.4	6.7± 6.7	3.3± 3.3

7 Diskussion und Ausblick

Weltweit wurden im Jahr 2011 640 Millionen Tonnen Obst produziert (FAO 2013b). Intensiv bewirtschaftete Obstplantagen erzielen höhere Erträge je Flächeneinheit und bessere Renditen als die meisten Feldfrüchte. Dieser Agrarsektor ist ausgesprochen arbeitsintensiv und sichert damit Betriebe, Arbeitsplätze und Einkünfte. Für den Obstanbau birgt der Klimawandel Risiken, kann aber auch Chancen mit sich bringen. Deswegen sind Untersuchungen zu den Auswirkungen von Klimaschwankungen und Klimaänderungen auf Obstgehölze von großer Bedeutung.

Um mögliche Folgen des Klimawandels im Obstbau zu quantifizieren werden sogenannte Klimawirkungsmodelle (Impaktmodelle) verwendet. Dabei dienen meteorologische und agrarklimatologische Parameter zur Berechnung der Entwicklungsstadien, des Ertrags und möglicher Schäden von Obstgehölzen. In den letzten Jahren wurden phänologische Modelle des öfteren implementiert, doch basieren die Modellansätze immer noch vorwiegend auf empirischen Grundlagen. In dieser Arbeit wurden Modelle zur Vorhersage des Blühbeginns und Blühendes für Sauerkirschen entwickelt. Dabei zeigte die Kombination aus dem wohl am stärksten pflanzenphysiologisch begründeten Chilling-Modell (Dynamic Modell) und dem GDD-Modell mit Tageslängenterm die besten Ergebnisse. In allen Anbauregionen konnten der Blühbeginn und das Blühende unter heutigen Bedingungen (1971-2000) mit maximalen Fehlern von nur wenigen Tagen vorhergesagt werden. Aus der Güte der Modelle lässt sich schließen, dass die berechneten Veränderungen im Eintreten der phänologischen Stadien unter geänderten Klimabedingungen tolerierbar sind. Jedoch könnte der Blühbeginn in einem künftig wärmeren Klima stärker vom Einfluss des winterlichen Kältereizes abhängen als in den derzeitigen Modellen angenommen wird. Ein tieferes Verständnis der physiologischen Prozesse die den Entwicklungsverlauf von Obstgehölzen regeln, könnte die phänologische Modellierung grundlegend verbessern, doch besteht in diesem Bereich noch erheblicher Forschungsbedarf.

Die Auswirkungen von Spätfrösten an Obstgehölzen sind sehr unterschiedlich und hängen vom individuellen Frostereignis, sowie vom Entwicklungsstadium der Obstgehölze während des Frostereignisses ab. Faktoren die Frostschäden an Obstgehölzen beeinflussen können sind die Intensität und Länge des Frostereignisses (Mazur 1969, Strang et al. 1980), die Geschwindigkeit des Temperaturabfalls (Weiser 1970, Strang et al. 1980, Friesen und Stushnoff 1985) und des Temperaturanstiegs (Olien 1967, Burke et al. 1976), die

Temperaturverhältnisse der Tage vor dem Frostereignis (Proebsting und Mills 1978a, Lu und Rieger 1993, Westwood 1993), sowie die Witterungsverhältnisse (Wind, relative Luftfeuchtigkeit und Bedeckungsgrad) während des Frostereignisses (Perry 1998). Daraus wird ersichtlich, dass sich die Berechnung von Frostschäden mittels meteorologischer und pflanzenspezifischer Parameter äußerst schwierig gestaltet. Das Ausmaß der berechneten Frostschäden ist in erster Linie von der Wahl des meteorologischen Datensatzes abhängig. Das Risiko von Spätfrost wird stark von den topografischen Gegebenheiten einer Region beeinflusst. In Senken ist die Intensität der Frostereignisse höher als in Hanglagen, wo die Kaltluft abfließt. Deswegen könnte die Verwendung von Rasterdaten die meteorologische Variabilität nicht ausreichend abbilden. Jedoch werden die meteorologischen Gegebenheiten einer Region auch nicht mit nur einer Wetterstation erfasst. Eine vertretbare Lösung könnte hier die Berechnung von Frostschäden mit Daten von einer Vielzahl einzelner Wetterstationen sein. Diese sollten sich jedoch in unmittelbarer Nähe der Obstplantagen befinden.

Erste Erkenntnisse über die Frostempfindlichkeit von Obstgehölzen stammen aus sorgfältigen Beobachtungen in Obstplantagen. Dabei wurde das Ausmaß der Schäden nach einem Frostereignis festgestellt und einer negativen Temperatur zugeordnet (Young 1920). Die kritischen Schadenstemperaturen der Obstgehölze sind arten- und sortenspezifisch (Miranda 2005, Proebsting und Mills 1978b), jedoch ist es bei Frostschäden im Freiland nicht einfach den Einfluss des Genotyps von anderen Faktoren zu trennen. Durch Versuche unter kontrollierten Bedingungen konnten die Temperaturbereiche, die einen bestimmten Schaden verursachen, verkleinert werden (Dennis und Howell 1974, Miranda 2005, Proebsting und Mills 1978b). Die Autoren haben dabei die mittlere, maximale und minimale Temperatur für welche 10 % sowie 90 % Blütenschäden entstehen, angegeben. In dieser Arbeit wurden die Frostschäden mit der mittleren Schadenstemperatur berechnet. Die Ergebnisse konnten jedoch nicht validiert werden, da keine beobachteten Frostschäden für die untersuchten Regionen zur Verfügung standen. Bei Berechnungen mit den maximalen und minimalen Schadenstemperaturen waren die Unterschiede der Blütenschäden nach einem Frostereignis extrem groß. Es werden genauere Erkenntnisse über die Frostresistenz von Sauerkirschen benötigt, um realistische Ertragsverluste berechnen zu können. Die angeführten Veränderungen unter künftigen Klimaverhältnissen sollen deswegen nur als Richtlinie dienen. Im Rahmen dieser Promotion wurden zusätzlich experimentelle Untersuchungen zur Frostempfindlichkeit von Kirschen durchgeführt, woraus neue Erkenntnisse über die Auswirkungen von Spätfrost an Kirschgehölzen gewonnen werden konnten (Matzneller et al. 2015).

Die entwickelten Impaktmodelle wurden zur Bestimmung der Eintrittstermine phänologischer Stadien, der Frostschäden und agrarklimatologisch relevanter Indizes unter heutigen (1971-2000) und künftigen Klimabedingungen verwendet. Als Antrieb dafür dienten meteorologische Parameter verschiedener regionaler Klimamodelle (RCM). Hierbei ist die Nutzung mehrerer RCM (Ensemble) sinnvoll, denn damit kann eine größere Bandbreite möglicher Entwicklungen des Klimas berücksichtigt werden. Jedoch sind in den RCM nicht alle Parameter gleichermaßen zuverlässig. Beispielsweise ist die Variabilität der minimalen Lufttemperatur von Modell zu Modell sehr unterschiedlich. Deswegen sind die vorhergesagten Veränderungen der Frostschäden oft kleiner, als die Unterschiede zwischen den RCM.

Bei der Interpretation der Ergebnisse sollte außerdem beachtet werden, dass in dieser Arbeit nur eines von sechs SRES-Emissionsszenarien verwendet wurde. Die SRES-Szenarien basieren auf zum Teil sehr unterschiedlichen Annahmen zu ökonomischen, sozialen und politischen Entwicklungen. Das Emissionsszenario A1B beschreibt eine zukünftige Welt mit sehr raschem Wirtschaftswachstum, einer bis Mitte des 21. Jahrhunderts wachsenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung, eine rasche Einführung neuer und effizienterer Technologien, sowie eine ausgewogene Nutzung von fossilen und nicht-fossilen Brennstoffen (IPCC 2001). Die im Rahmen des fünften Sachstandberichts der IPCC (2013) neu entwickelten Szenarien („Representative Concentration Pathways“, RCP), definieren hingegen mehrere festgelegte Energiezunahmen (Strahlungsantrieb), welche die Erde durch die Verstärkung des Treibhauseffekts bekommen könnte und basieren somit nicht mehr auf der schwer vorhersagbaren Menschheitsentwicklung und deren Emissionen. Für Berechnungen der Auswirkungen des Klimawandels auf den Obstbau kann die Wahl des Szenarios zu grundlegenden Unterschieden in den Ergebnissen führen. Um eine größere Spannweite der zu erwartenden Klimaänderungen abzuschätzen, sollte deswegen die Verwendung von mehreren Szenarien stets in Betracht gezogen werden.

In dieser Arbeit wurden die möglichen Folgen des Klimawandels für den Sauerkirschanbau auf der Grundlage von Veränderungen in der Lufttemperatur und Niederschlagshöhe untersucht. Jedoch beeinflusst eine Vielzahl von klimatischen Faktoren, wie Globalstrahlung, Windstärke, relative Luftfeuchtigkeit und das Auftreten von Extremwetterereignissen (Hagel, Starkregen, Stürme) die Ertragsleistung von Obstgehölzen. Hierbei spielt auch der atmosphärische CO₂-Gehalt eine wichtige Rolle, der bereits seit Beginn der Industrialisierung von etwa 280 ppm auf gegenwärtig ca. 395 ppm angestiegen ist. In den SRES-Szenarien wird

angenommen, dass sich die CO₂-Konzentration bis Ende dieses Jahrhunderts auf 700 ppm (Szenario A1B) erhöhen könnte (IPCC, 2007). Experimente unter kontrollierten Bedingungen haben gezeigt, dass Zunahmen des CO₂-Gehalts in der Luft, bei optimaler Licht-, Nährstoff- und Wasserversorgung, die Biomasse und den Ertrag von Obstgehölzen steigern können. Kirschsämlinge wiesen bei einer CO₂-Konzentration von 700 ppm eine 44 % höhere Photosyntheserate als unter natürlichen Bedingungen auf (Centritto et al. 1999). In Italien durchgeführte FACE-Versuche (FACE: Free Air Carbon Enrichment) an Weinreben zeigten bei atmosphärischen CO₂-Gehalten von 700 ppm eine deutliche Zunahme in Biomasse und im Fruchtertrag (40-50 %; Bindi et al., 2001). Jedoch liegen nur wenige Langzeitstudien über die Auswirkungen von erhöhten CO₂-Konzentrationen auf Obstgehölze vor. In einer 17-jährigen Untersuchung an Bitterorangen wurde beobachtet, dass ein deutlicher Mehrertrag in den ersten Jahren, durch Akklimatisierung der Gehölze an höhere CO₂-Gehalte im Laufe der Zeit abgenommen hat. Die Orangengehölze unter erhöhten CO₂-Konzentrationen hatten in den späteren Versuchsjahren aber noch höhere Fruchterträge als die Kontrollbäume (Kimball et al. 2007). Im Obstbau müssen bei Modellberechnungen zu Ertragsveränderungen durch höhere atmosphärische CO₂-Gehalte, pflanzenbauliche Faktoren, wie Bestandsdichte, Anbausystem, Gehölzschnitt, Ausdünnung, Nährstoff- und Wasserversorgung berücksichtigt werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Ertragsleistung von Obstgehölzen ist das Auftreten von Schädlingen und Krankheiten. Die meisten Schadinsekten im Obstbau sind wechselwarm und könnten deswegen vom bevorstehenden Temperaturanstieg profitieren. Unter heutigen Bedingungen bildet der Apfelwickler (*Cydia pomonella*) in der nordöstlichsten Obst-anbauregion Deutschlands (Niederelbe) im Jahresverlauf eine Generation aus. Abschätzungen im Forschungsprojekt KliO deuten darauf hin, dass bis Ende dieses Jahrhunderts mit einer kompletten zweiten bzw. sogar dritten Generation im Jahr zu rechnen ist (Chmielewski 2011b). Gleichmaßen könnte der Klimawandel aber auch die aus obstbaulicher Sicht nützlichen Insekten, wie den Siebenpunkt-Marienkäfer, der Blattläuse vertilgt, begünstigen. Seine Fraßaktivität erhöht sich bei einer Temperaturzunahme von 2 °C deutlich (Freier 2004). Die unter geänderten Klimabedingungen niederschlagsreicheren und milderen Winter könnten die Ausbreitung von Pilzkrankungen fördern. Modellrechnungen von Salinari et al. (2006) haben gezeigt, dass in Italien im Laufe dieses Jahrhunderts ein erhöhter Befallsdruck von Mehltau (*Plasmopara viticola*) an Weinreben zu erwarten ist. Darum wird ein künftig vermehrtes Auftreten von Schädlingen und Krankheiten einen umfassenden und zeitlich angepassten Pflanzenschutz erforderlich machen.

Eine Vielzahl von klimatischen und pflanzenbaulichen Faktoren beeinflusst die Ertragsbildung von Obstgehölzen. Deswegen gestaltet sich die Quantifizierung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Obstbau durch Impakt- und Klimamodelle äußerst schwierig. Die Klimawirkungsforschung kann dabei eine Entscheidungsgrundlage für längerfristige Investitionen (Überdachung, Frostschutzberegnung, Bewässerung, Anbausystem, Wahl der Sorte und Unterlage, etc.) bereitstellen, jedoch müssen die Unsicherheiten der Impakt- und Klimamodelle berücksichtigt werden. Bereits unter heutigen Bedingungen sind die Unterschiede der beobachteten und modellierten Größen oft zu hoch, um konkrete Aussagen zu treffen. Deswegen sollte derzeit der Entwicklung und Validierung von Impaktmodellen der Vorrang gegenüber detaillierten Abschätzungen von Ertragsschäden unter künftigen Klimaverhältnissen gegeben werden (Chmielewski und Blümel 2013).

8 Literaturverzeichnis

- Abraham Z., Tan P.N., Perdinan, Winkler J.A., Zhong S., Liszewska M. (2013) Distribution Regularized Regression Framework for Climate Modelling. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), pp. 333-341.
- AR, Abteilung für Regionalpolitik (2007) Regional operational programme for Wielkopolska 2007-2013. Downloaded bei: <http://www.archiwum.wrpo.wielkopolskie.pl>, zuletzt abgerufen am 24. Juli 2014.
- Anderson J.L., Richardson E.A., Kesner C.D. (1986) Validation of chill unit and flower bud phenology models for ‚Montmorency‘ sour cherry. *Acta Hort* 184:71-78.
- Baskerville G.L., Emin P. (1969) Rapid Estimation of Heat Accumulation from Maximum and Minimum Temperatures. *Ecology* 50:514-517.
- Benedek P. (1996) Insects pollination of fruit crops. In: Nyeki J., Soltesz M. (Eds) *Floral Biology of Temperate Zone Fruit Trees and Small Fruits*, Akademiai Kiado, Budapest, Hungary, pp. 287-340.
- Beniston M., Stephenson D.B., Christensen O.B., Ferro C.A.T., Frei C., Goyette S., Halsnaes K., Holt T., Jylhä E., Koffi B., Palutikof J., Schöll R., Semmler T., Woth K. (2007) Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change* 81:75-89.
- Beppu K., Kataoka I. (1999) High temperature rather than drought stress is responsible for the occurrence of double pistils in ‚Satohnishiki‘ sweet cherry. *Scientia Horticulturae* 81:125-134.
- Bindi M., Fibbi L., Miglieta F. (2001) Free air CO₂ enrichment (FACE) of grapevine (*Vitis vinifera* L.): II. Growth and quality of grape and wine in response to elevated CO₂ concentrations. *Eur J Agron* 14:145-155.
- Blümel K., Chmielewski F.M. (2013) Klimawandel in Hessen - Chancen, Risiken und Kosten für den Obst- und Weinbau. Abschlussbericht, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG), http://www.agrar.hu-berlin.de/agrarmet/forschung/fp/CHARIKO_html, zuletzt abgerufen am 24. Juli 2014.

- Blümel K., Chmielewski F.M. (2012) Shortcomings of classical phenological forcing models and a way to overcome them. *Agr Forest Meteorol* 164:10-19.
- Brunetti M., Buffoni L., Maugeri M., Nanni T. (2000) Trends of minimum and maximum daily temperatures in Italy from 1965 to 1996. *Theor Appl Climatol.* 66:49-60.
- Burke M.J., Gusta L.V., Quamme H.A., Weiser C.J., Li P.H. (1976) Freezing and injury in plants. *Ann Rev Plant Physiol* 27:507-528.
- Bussay A., Szinell C., Szentimery T. (1999) Investigation and Measurements of Droughts in Hungary. Hungarian Meteorological Service: Budapest.
- Cannell M.G.R., Smith R.I. (1983) Thermal time, chill days and prediction of budburst in *Picea sitchensis*. *J Appl Ecol* 20:951-963.
- Centritto M., Magnani F., Lee H.S.J., Jarvis P.G. (1999) Interactive effects of elevated CO₂ and drought on cherry (*Prunus avium*) seedlings. II. Photosynthetic capacity and water relations. *New Phytologist* 141:141-153.
- Cerny V. (1985) Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: an efficient simulation algorithm'. *Journal of Optimization Theory and Applications* 45:41-51.
- Chmielewski F.M., Blümel K. (2013) Klimawandel und Obstbau. *promet* 38, 1/2, Deutscher Wetterdienst (Selbstverlag) Offenbach, 32-41.
- Chmielewski F.M., Blümel K., Henniges Y., Blanke M., Weber R.W.S., Zoth M. (2011) Phenological models for the beginning of apple blossom in Germany. *Meteorol Z* 20:487-496.
- Chmielewski F.M., Blümel K., Hennings Y., Müller A. (2008a) Vulnerability of Fruit Growers to Climate Change. Observed Impacts and Assessment. *Italian Journal of Agronomy*, Vol 3, 3:605-606.
- Chmielewski F.M., Blümel K., Hennings Y., Müller A. (2008b) Climate Change and Fruit growing in Germany. Proceedings to the 18th International Conference on Biometeorology. 22-26 September 2008 Tokyo, Japan, 4 p.

- Chmielewski F.M., Blümel K., Henniges Y., Müller A., Weber R.W.S. (2009a) Klimawandel und Obstbau in Deutschland (KliO), Abschlussbericht, BMBF-Verbundprojekt unter Koordination der Humboldt-Universität Berlin, Förderkennzeichen 01LS05024, 239 S.
- Chmielewski F.M., Blümel K., Hennings Y., Müller A., Weber R.W.S. (2009b) Klimawandel: Chancen, Risiken und Kosten für den deutschen Obstbau. In: Mohammadzadeh M., Biebeler H., Bardt H. (Hrsg.): Klimaschutz und Anpassung an die Klimafolgen - Strategien, Maßnahmen und Anwendungsbeispiele, Köln, Institut der deutschen Wirtschaft Köln Medien GmbH, Köln, 279-286.
- Chmielewski F.M., Blümel K., Palesova I. (2012b) Climate change and possible shifts of dormancy release for deciduous fruit crops in Germany. *Climate Research* 54, 209-219.
- Chmielewski F.M., Heider S., Moryson S., Bruns E. (2012a) International Phenological Observation Networks. Concept of IPG and GPM (Chapter 8). In: Schwartz (ed.), *Phenology: an integrative environmental science*. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, The Netherlands, 2nd edition.
- Chmielewski F.M. (2011a) Wasserbedarf in der Landwirtschaft (Abschn. 2.3). In: Lozan JL, Graß H, Hupfer P, Krabe L, Schönwiese CD (Eds): *Warnsignal Klima. Genug Wasser für alle? Wissenschaftliche Auswertungen*, Hamburg, 3. Auflage 149-156.
- Chmielewski F.M. (2011b) Klimawandel und Landwirtschaft in der Metropolregion Hamburg. In: Storch H., Claußen M. (Hrsg) *Klimabericht der Metropolregion Hamburg*. Springer Verlag, 211-227.
- Christensen J., Christensen O. (2007) A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Clim Chang* 81:7-30.
- Christensen J. H., Hewitson B., Busuioc A., Chen A., Gao X., Held I., Jones R., Kolli R. K., Kwon W.T., Laprise R., Magaña Rueda V., Mearns L., Menéndez C.G., Räisänen J., Rinke A., Sarr. A., Whetton P. (2007) Regional climate projections in Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L., eds *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press 847-940.

- Chuine I. (2010) Why does phenology drives species distribution? Philosophical Transaction of the Royal Society - Biology 365:3149-3160.
- Couvillon G.A. (1995) Temperature and Stress Effects on rest in Fruit Trees: A Review. Acta Horticulture 395:11-19.
- CSO, Central Statistical Office (2012) Statistical Yearbook of Agriculture 2011. Downloaded bei: <http://www.stat.gov.pl>, zuletzt abgerufen am 24. Juli 2014.
- DARD, Department of Agriculture and Rural Development (2011) Michigan Agricultural Statistics 2010-2011. Downloaded bei: <http://www.nass.usda.gov>, zuletzt abgerufen am 24. Juli 2014.
- Darbyshire R., Webb L., Goodwin I., Barlow S. (2011) Winter chilling trends for deciduous fruit trees in Australia. Agric For Meteorol 151:1074-1085.
- Delaplane K.S., Mayers D.F. (2000) Crop Pollination by Bees, CABI Publishing, Wallingford, UK.
- Dennis F.G., Howell G.S. (1974) Cold hardiness of tart cherry bark and flower buds. Michigan State University Farm Sciences Research Report 220.
- Déqué M., Somot S. (2010) Weighted frequency distributions express modelling uncertainties in the ENSEMBLES regional climate experiments. Climate Research 44:195-209.
- DWD, Deutscher Wetter Dienst (2013) Bienenflug. Downloaded bei: <http://www.dwd.de>, zuletzt abgerufen am 24. Juli 2014.
- Douguedroit A (1987) The variations of dry spells in Marseilles from 1865 to 1984. International Journal of Climatology 7:541-551.
- Dubrovsky M., Svoboda M.D., Trnka M., Hayes M.J., Wilhite D.A., Zalud Z., Hlavinka P., (2009) Application of relative drought indices in assessing climate-change impacts on drought conditions in Czechia. Theor Appl Climatol 96:155-171.
- Edson C.E., Nugent J.E., Thornton G.E. (1998) Integrated sour cherry (*Prunus Cerasus*) Production in northwest lower Michigan. Proc Third Int Cherry Sym, Acta Hort, 468, ISHS 1998.

- Eggert F.P. (1951) A study of rest varieties of apple and in other fruit species grown in New York State. *Proceeding Journal of the American Society for Horticultural Science* 51:169-178.
- Epifani C., Esposito S., Vento D. (2004) Persistence of wet and dry spells in Italy. First Results in Milano from 1858 to 2000. *Proceedings from the 14th International conference on clouds and precipitation 2004*. Bologna, 18-24.
- Erez A. (2000) Bud dormancy; phenomenon, problems and solutions in the tropics and subtropics. In: Erez A. (Ed.) *Temperate Fruit Crops in Warm Climates*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 17-48.
- Erez A., Couvillon G.A. (1987) Characterization of the influence of moderate temperatures on rest completion in peach. *J Am Soc Hortc Sci* 112:677-680.
- Erez A., Couvillon G.A., Hendershott C.H. (1979a) Effect of cycle length on chilling negation by high-temperatures in dormant peach leaf buds. *J Am Soc Hortc Sci* 104:573–576.
- Erez A., Couvillon G.A., Hendershott C.H. (1979b) Quantitative chilling enhancement and negation in peach buds by high-temperatures in a daily cycle. *J Am Soc Hortc Sci* 104:536–540.
- Even-Chen Z., Weinbaum S.A., Pearcy R.W. (1981) High temperature effects on leaf resistance, leaf water potential, and photosynthesis of nonbearing prune trees. *J Amer Soc Hort Sci* 106:216-219.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2013a) Downloaded bei: <http://faostat3.fao.org>, zuletzt abgerufen am 24. Juli 2014.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2013b) *Statistical Yearbook 2013* Downloaded bei: <http://www.fao.org>, zuletzt abgerufen am 24. Juli 2014.
- Fishman S., Erez A., Couvillon G.A. (1987a) The temperature-dependence of dormancy breaking in plants-mathematical analysis of a 2-step model involving a cooperative transition. *J Theor Biol* 124:473-483.

- Fishman S., Erez A., Couvillon G.A. (1987b) The temperature-dependence of dormancy breaking in plants-computer simulation of processes studied under controlled temperatures. *J Theor Biol* 126:309-321.
- Flore J.A., Howell Jr. G.S. (1987) Environmental and physiological factors that influence cold hardiness and frost resistance in perennial crops. In: *Proceedings of Int. Conference on Agrometereology, Cesena (Italy)* p.139-150.
- Flore J.A., Layne D.R. (1999) Photoassimilate production and distribution in cherry. *HortScience* 34:1015–1019.
- Freier B. (2004) Pflanzenschutz, Welche Risiken liegen vor uns, und wie bekommen wir sie in den Griff? In: Isermeyer F (Hrsg.) *Ackerbau 2025. Landbauforschung Völkenrode. Sonderheft* 274: 99-102.
- Friesen L.J., Stushnoff C. (1985). Spring frost injury relative to phenophase bud development in Saskatoon berry. *Hortscience* 20:744-746.
- Goergen K., Beersma J., Hoffmann L., Junk J. (2013) ENSEMBLES-based assessment of regional climate effects in Luxembourg and their impact on vegetation. *Climatic Change* 119:761-773.
- Giorgi F., Bi X., Pal J. (2004) Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. II: climate change scenarios (2071-2100). *Climate Dynamics* 23:839-858.
- Goldbach U., Sutor P. (2011) *Agrarmärkte 2010. Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der Ländlichen Räume.*
- Haldimann P., Feller U. (2003) *Hitzestress bei Pflanzen.* Unipress, 116, Universität Bern.
- Han J.H., Cho J.G., Son I.C., Kim S.H., Lee I.B., Choi I.M., Kim D. (2012) Effects of elevated carbon dioxide and temperature on photosynthesis and fruit characteristics of 'Niitaka' pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai). *Horticulture, Environment and Biotechnology* 53:357-361.
- Hänninen H. (1990) Modelling the annual growth rhythm of trees: conceptual, experimental, and applied aspects. *Silva Carelica* 15:35-45.

- Hayhoe K., Wake C., Anderson B., Liang X.Z., Maurer E., Zhu J., Bradbury J., DeGaetano A., Stoner A.M., Wuebbles D. (2008) Regional climate change projections for the Northeast USA. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 13:425-436.
- Heide O.M. (2008) Interaction of photoperiod and temperature in the control of growth and dormancy of *Prunus* species. *Scie Hort* 115:309-314.
- Henninges Y., Vollmer I., Weber R.W.S., Götgens M., Chmielewski F.M. (2007) Der Klimawandel, eine Herausforderung für den norddeutschen Obstbau. *Mitteilungen des Obstbauversuchsringes des Alten Landes* 62:147-151.
- Hirschi M., Seneviratne S.I., Alexandrov V., Boberg F., Boroneant C., Christensen O.B., Formayer H., Orłowsky B., Stepanek P. (2011) Observational evidence for soil-moisture impact on hot extremes in southeastern Europe. *Nature Geoscience* 4:17-21.
- Howell G.S., Stackhouse S.S. (1973) The effect of defoliation time on acclimation and dehardening in tart cherry (*Prunus cerasus* L.). *J Amer Soc Hort Sci* 98:132-136.
- Hrotkó K. (2003) Cseresznye és meggy. *Mezőgazda Kiadó*, Budapest.
- Iezzoni A., Schmidt H., Albertini A. (1991) Cherries (*Prunus spp.*), p. 110–173. In: J.N. Moore, J.R. Ballington (eds.). *Genetic resources of temperate fruit and nut crops*. Intl Soc Hort Sci, Wageningen, The Netherlands.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) Fifth assessment report, the Physical Science Basis. Downloaded bei: www.ipcc.ch zuletzt abgerufen am 24. Juli 2014.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) Fourth assessment report, Summary for Policymakers. Downloaded bei: www.ipcc.ch, zuletzt abgerufen am 24. Juli 2014.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2001) Third assessment report, the Scientific Basis. Downloaded bei: www.ipcc.ch, zuletzt abgerufen am 24. Juli 2014.
- Jaycox E.R. (1977) Beekeeping in the Midwest. Circular - Illinois Cooperative Extension Service, 1125. University of Illinois Press.

- Kimball B.A.; Idso S.B.; Johnson S.; Rillig M.C. (2007) Seventeen years of CO₂ enrichment of sour orange trees: final results. *Global Change Biology* 13:2171-2183.
- Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P. (1983) Optimization by Simulated Annealing. *Science* 220:671-680.
- Körner C. (2006) Significance of temperature in plant life. In: Morrison J.I.L., Morecroft M.D. (eds) *Plant growth and climate change*. Blackwell, Oxford, pp 48-69.
- Körner C., Basler D. (2010) Phenology Under Global Warming. *Science* 327:1461-1462.
- Koumanov K.S. (2002) Drought mitigation effects of microirrigation in orchards. ICID International Conference on “Drought Mitigation and Prevention of Land Desertification”, Bled, Slovenia, 20-26 April, 10 pp.
- Ladanyi M., Persely S., Szabo T., Soltesz M., Nyeki J., Szabo Z. (2009) The application of a heat sum model for the budburst of sour cherry varieties grown at Ujfeherto. *Int J Hort Sc* 4:105-112.
- Lazaro R., Rodrigo F.S., Gutierrez L., Domingo F., Puigdefafragas J. (2001) Analysis of 30-year rainfall record in semi-arid SE Spain for implications on vegetation”. *Journal of Arid Environments* 48:373-395.
- Legave J.M., Garcia M., Marco F. (1982) Some descriptive aspects of drops process of flower buds or young flowers on apricot in south of France. *Acta Hort* 121:75-83.
- Linkosalo T., Häkkinen R., Hänninen H. (2006) Models of the spring phenology of boreal and temperate trees: is there something missing? *Tree Physiol* 26:1165-1172.
- Linville D.E. (1990) Calculating chilling hours and chill units from daily maximum and minimum temperature observations. *Hortscience* 25:14-16.
- Lloyd-Hughes B., Saunders M.A. (2002) A drought Climatology for Europe. *International Journal of Climatology* 22:1571-1592.
- Lu S., Rieger M. (1993) Effect of temperature preconditioning on ovary freezing tolerance of fully opened peach flowers. *J Hort Sci* 68:343-347.

- Mazur P. (1969) Freezing injury in plants. *Ann Rev Plant Physiol* 20:419-448.
- Marini R.P. (2009) Growing Cherries in Virginia. Virginia Cooperative Extension 422-018.
- Matzneller P., Götz K.P., Chmielewski F.M. (2015) Spring frost vulnerability of sweet cherries under controlled conditions. *Int J Biometeorol* DOI:10.1007/s00484-015-1010-1.
- Matzneller P., Ventura F., Gaspari N., Rossi Pisa P. (2010) Analysis of climatic trends in data from the agrometeorological station of Bologna-Cadriano, Italy (1952-2007). *Climatic Change* 100:717-731.
- McKee T.B., Doesken N.J., Kliest J. (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17-22 January, Anaheim, CA. American Meteorological Society: Boston, MA; 179-184.
- Meier U. (1997) BBCH-Monograph. Growth stages of plants. *Entwicklungsstadien von Pflanzen. Estadios de las plantas. Stades de développement des plantes*. Blackwell Wissenschafts-Verlag Berlin, Wien, 622 p.
- Metropolis N., Rosenbluth A.W., Rosenbluth M.N., Teller A.H., Teller E. (1953) Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *J Chem Phys* 21:1087-1092.
- Micke W.C., Doyle J.F., Yeager J.T. (1983) Doubling potential of sweet cherry cultivars. *California Agric* 37:24-25.
- Miranda C., Santesteban L.G., Royo J.B. (2005) Variability in the relationship between frost temperatures and injury level for some cultivated *Prunus* species. *HortScience* 40:357-361.
- Olien C.R. (1967) Freezing stresses and survival. *Ann Rev Plant Physiol* 18:387-408.
- Perry K.B. (1998) Basics of frost and freeze protection for horticultural crops. *HortTechnology* 8:10-15.
- Philp G.L. (1933) Abnormality in sweet cherry blossoms and fruit. *Bot Gaz* 94:815-820.
- Poling E.B. (2008) Spring Cold Injury to Winegrapes and Protection Strategies and Methods. *HortScience* 43:1652-1662.

- Pór J. (1982) Cseresznye és meggy. In: Pór J. és Faluba Z. (szerk.), Mezőgazdasági Kiadó, Budapest. 108–116., 125–153. 188–221., 283–345. p.
- Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. (1997) Numerical Recipes in Fortran 77. The Art of Scientific Computing, Second Edition. Cambridge University Press, 994 pp.
- Proebsting E.L., Mills H.H. (1978a) A synoptic analysis of peach and cherry flower bud hardiness. J Am Soc Hort Sci 103:842-845.
- Proebsting E.L., Mills H.H. (1978b) Low temperature resistance of developing flower buds of six deciduous fruit species. J Am Soc Hort Sci 103:192-198.
- Robertson G.W. (1968) A biometeorological time scale for a cereal crop involving day and night temperatures and photoperiod. Int J Biometeorol 12:191-223.
- Sagili R.R., Burgett D.M. (2011) Evaluating Honey Bee Colonies for Pollination. Pacific Northwest Extension publications, Oregon State University, University of Idaho, Washington State University.
- Salinari F., Giosue S., Tubiello F.N., Rettori A., Rossi V., Spanna F., Rosenzweig C., Gullino M.L. (2006) Downy mildew (*Plasmopara viticola*) epidemics on grapevine under climate change. Global Change Biol 12:1299–1307.
- Sams C.E., Flore J.A. (1982) The influence of age, position and environmental variables on net photosynthetic rate of sour cherry leaves. J Amer Soc Hort Sci 107:339-344.
- Sarvas R. (1974) Investigations on the annual cycle of development of forest trees II. Autumn dormancy and winter dormancy, Commum. Inst For Fenn 84:1-101.
- Schoof J.T., Pryor S.C., Suprenant J. (2010) Development of daily precipitation projections for the United States based on probabilistic downscaling. Journal of Geophysical Research 115, DOI: 10.1029/2009JD013030.
- Schwartz M.D., Ahas R., Aasa A. (2006) Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. Global Change Biology 12:343-351.

- Seneviratne S.I., Lüthi D., Litschi M., Schär C. (2006) Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature* 443:205-209.
- SLRF, Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz (2010). Statistische Bände 2010, Band 398. Downloaded bei: <http://www.statistik.rlp.de>, zuletzt abgerufen am 24. Juli 2014.
- Sommerville D. (1999) Honey bees in cherry and plum pollination. *Agnote DAI/126*. Produced by Information Delivery Program.
- Strang J.G., Lombard P.B., Westwood M.N., Weiser C.J. (1980) Effect of duration and rate of freezing and tissue hydration of “Barlett” pear buds, flowers, and small fruits. *J Am Soc Hort Sci* 105:102-107.
- Szabó Z., Szabó T., Gonda I., Soltész M., Thurzó S., Nyéki J. (2006) The current situation of sour cherry production and possibilities for development. *Hungarian Agricultural Research*.
- Szalai S., Szinell C. (2000) Comparison of two drought indices for drought monitoring in Hungary - a case study. In *Drought and Drought Mitigation in Europe*, Vogt JV, Somma F (eds). Kluwer: Dordrecht, 161-166.
- Szenteleki K., Gaál M., Mézes Z., Soltész M., Nyéki J., Szabó Z. (2010) Correlation of precipitation distribution and quality sweet cherry production. *International Journal of Horticultural Science* 16:39-43.
- Thomas D., Hayman P., James P. (2012) Understanding and managing the risks and opportunities from climate change on Cherry production. South Australian Research and Development Institute (Sustainable Systems). DAFF project R1#087.
- Tilya F.F., Mhita M.S. (2007) Frequency of wet and dry spells in Tanzania. *Climate and Land Degradation*. Springerlink 197-204.
- Tomozeiu R., Pavan V., Cacciamani C. (2003) Observed changes in extreme minimum and maximum temperature in Emilia Romagna (1958-2000). *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 5, 03535.
- Trenberth K.E., Shea D.J. (2005) Relationships between precipitation and surface temperature. *Geophysical Research Letters*, 32, L14703.

- USDA, United States Department of Agriculture (2009) Census of Agriculture 2007, Vol. 1, Chapter2: County Level Data. Downloaded bei: <http://www.agcensus.usda.gov>, zuletzt abgerufen am 24. Juli 2014.
- Van der Linden P., Mitchell J.F.B. (2009) ENSEMBLES: climate change and its impacts: summary of research and the results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter, 160 pp.
- Wackernagel H. (1998) Multivariate Geostatistics. An Introduction with Applications. Springer–Verlag Berlin Heidelberg New York 291 p.
- Wagner S., Berg P., Schadler G., Kunstmann H. (2012) High resolution regional climate model simulations for Germany: Part II—projected climate changes. *Climate Dynamics* 40:415-427.
- Weinberger J.H. (1950) Chilling requirements of peach varieties. *Proc Am Soc Hortic Sci* 56:122–128.
- Weiser C.J. (1970) Cold resistance and injury in woody plants. *Science* 169:1269-1277.
- Westwood M.N. (1993) Temperate-zone Pomology: Physiology and Culture. Timber Press, Portland.
- Wilks D. S. (2006) Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, 2nd Edition, Elsevier 586 Academic Press 627 pp.
- Young F.D. (1920) Frost and the prevention of frost damages in fruit trees. USDA Farmers Bul. 1096.
- Zavalloni C., Andresen J.A., Black J.R., Winkler J.A., Guentchev G., Piromsopa K., Pollyea A., Bisanz J.M. (2008) A preliminary analysis of the impacts of past and projected future climate on sour cherry production in the Great Lakes Region of the USA. *Acta Hortic* 803:123-130.
- Zavalloni C., Andersen J.A., Flore J.A. (2006) Phenological models of flower bud stages and fruit growth of ‘Montmorency’ sour cherry based on growing degree-days accumulation. *J Amer Soc Hort Sci* 131:601-607.

9 Anhang

Tab. A1: Monats- und Jahresmittel der beobachteten (OBS) und modellierten (C20) Lufttemperatur (°C) im Zeitraum 1971-2000 in den Anbauregionen Przybroda (PR, Polen), Eau Claire (EC, Michigan), Hart (HA, Michigan) und Maple City (MC, Michigan).

	Monat												Jahr
	Jan.	Feb.	Mär.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	
PR													
OBS	-1.1	0.1	3.5	9.2	14.4	17.2	19.6	19.0	14.0	8.9	3.6	0.3	9.1
C20	-1.0	-0.1	3.4	7.9	13.5	16.2	18.1	17.8	13.4	8.6	3.5	0.5	8.5
EC													
OBS	-4.6	-2.6	2.8	9.2	15.5	20.6	22.9	21.9	17.9	11.5	4.8	-1.4	9.9
C20	-4.3	-3.4	2.1	9.3	15.4	20.2	23.2	22.6	18.2	12.3	4.8	-1.3	9.9
HA													
OBS	-5.5	-4.5	0.1	6.8	13.1	18.2	20.8	19.9	15.6	9.5	3.3	-2.3	7.9
C20	-5.5	-5.3	-0.6	6.4	12.8	17.5	20.8	20.0	15.6	9.9	3.1	-2.0	7.7
MC													
OBS	-5.8	-4.8	-0.5	6.1	12.6	17.9	20.7	19.9	15.6	9.8	3.1	-2.7	7.7
C20	-5.4	-5.8	-1.1	7.0	13.6	18.2	21.0	19.8	15.3	9.3	2.7	-2.0	7.7

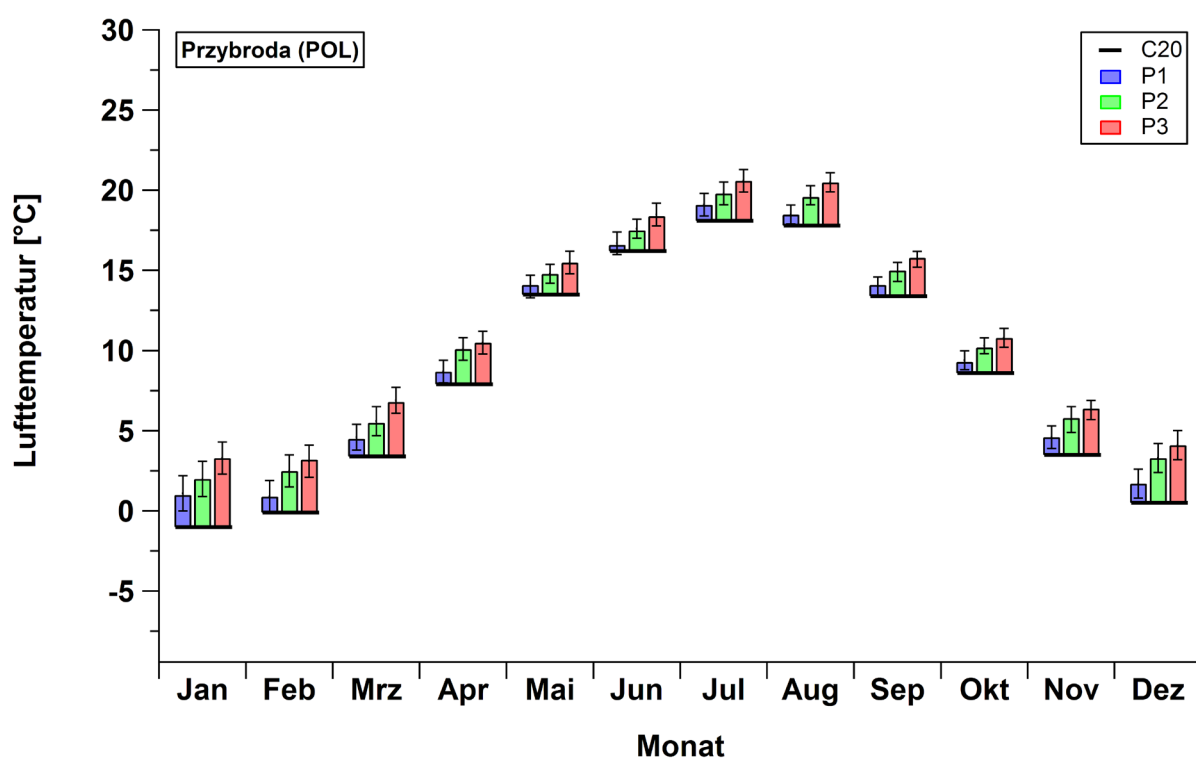


Abb. A1: Monatsmittelwerte der Lufttemperatur im Kontrolllauf (C20: 1971-2000) und Differenz zwischen den Zeiträumen P1 (2011-2040), P2 (2041-2070) und P3 (2071-2100) gegenüber C20 im Anbaugbiet Przybroda (Mittel aus 5 RCMs; Fehlerbalken = 95 %-Konfidenzintervalle; Differenzen zwischen Szenarien (P1, P2, P3) und C20-Lauf signifikant ($p < 0.05$), außer für P1 gegenüber C20 im Februar, Mai, August und Dezember).

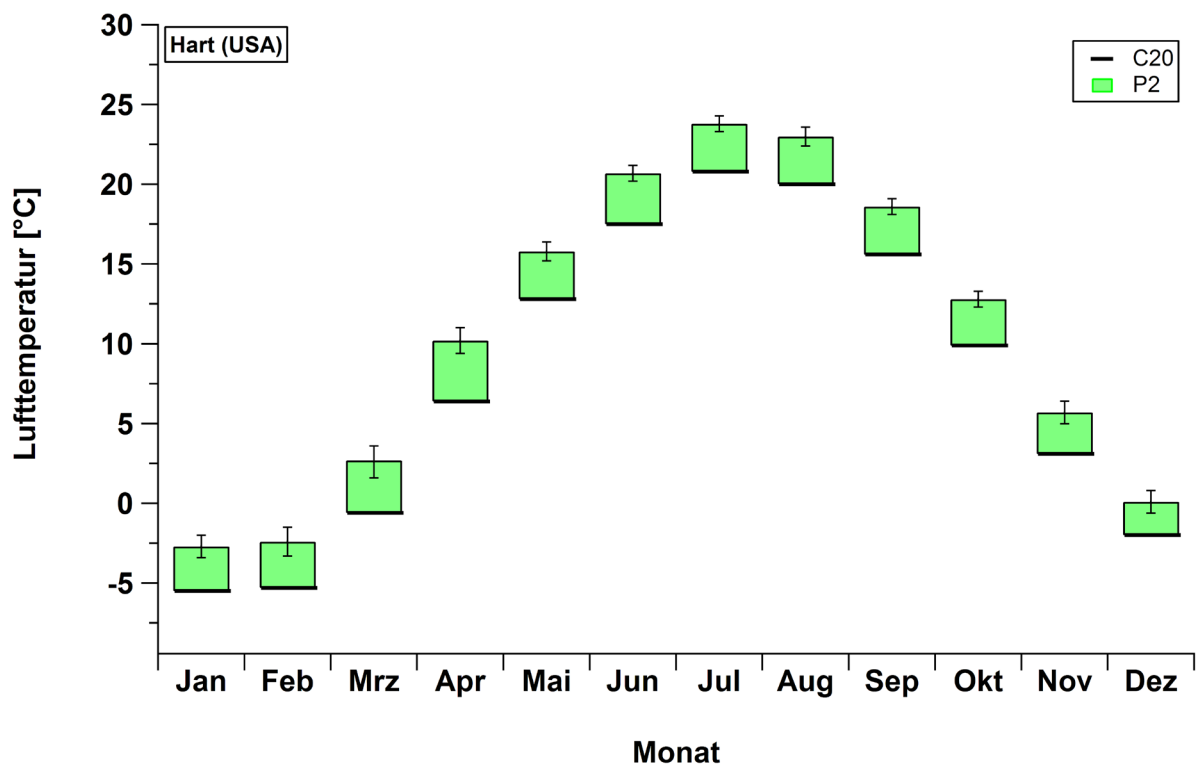
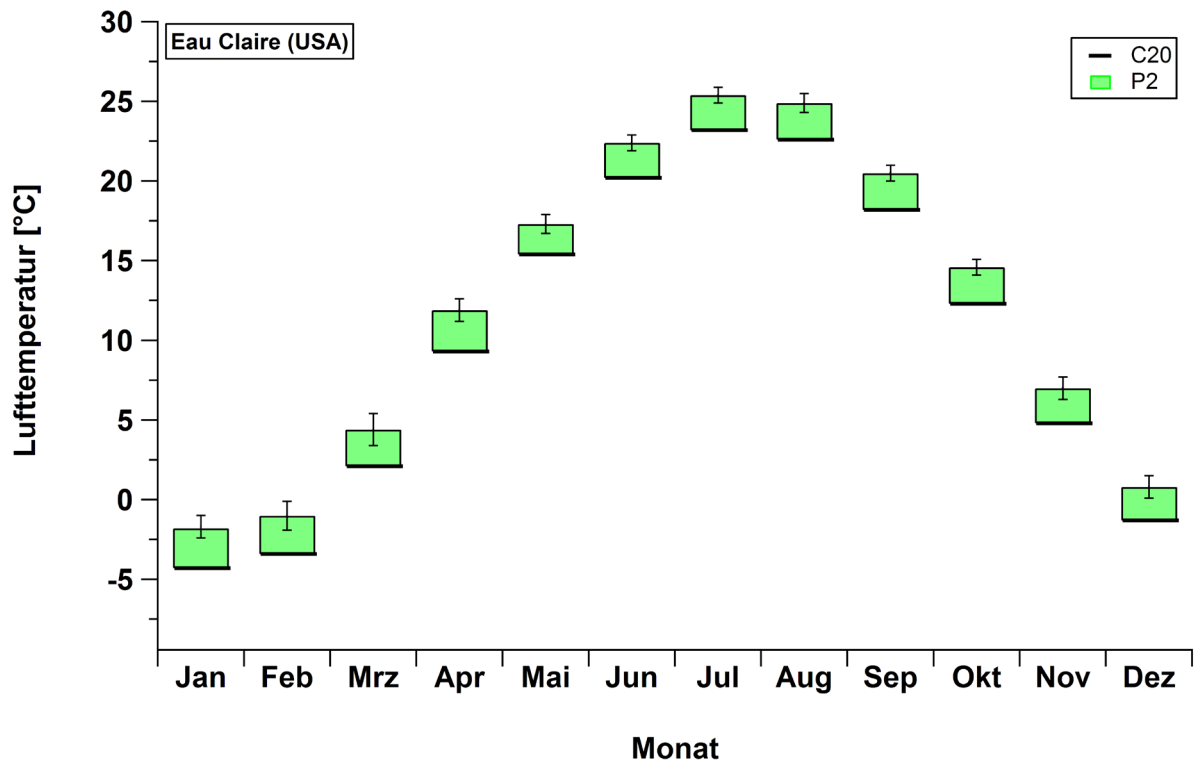


Abb. A2: Monatsmittelwerte der Lufttemperatur im Kontrolllauf (C20: 1971-2000) und Differenz zwischen den Zeitraum P2 (2041-2070) gegenüber C20 in den Anbaugeländen Eau Claire und Hart (Mittel aus 4 RCMs; Fehlerbalken = 95 %-Konfidenzintervalle; Differenzen zwischen Szenario (P2) und C20-Lauf signifikant bei $p < 0.05$).

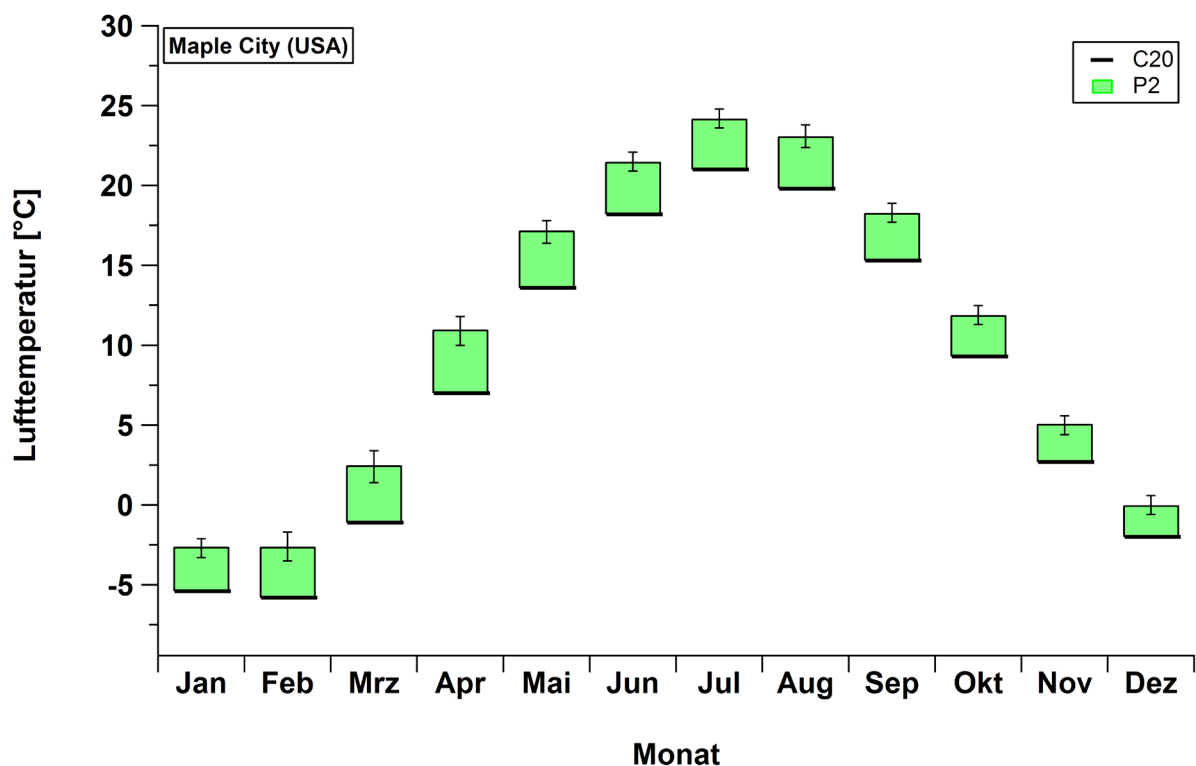


Abb. A3: Monatsmittelwerte der Lufttemperatur im Kontrolllauf (C20: 1971-2000) und Differenz zwischen den Zeitraum P2 (2041-2070) gegenüber C20 in der Anbauregion Maple City (Mittel aus 4 RCMs; Fehlerbalken = 95 %-Konfidenzintervalle; Differenzen zwischen Szenario (P2) und C20-Lauf signifikant bei $p < 0.05$).

Tab. A2: Monats- und Jahresmittel der beobachteten (OBS) und modellierten (C20) Niederschlagshöhe (mm) im Zeitraum 1971-2000 in den Anbauregionen Przybroda (PR; Polen), Eau Claire (EC; Michigan), Hart (HA; Michigan) und Maple City (MC; Michigan).

	Monat												Jahr
	Jan.	Feb.	Mär.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	
PR													
OBS	28.1	26.7	36.9	27.5	45.9	63.3	76.6	66.9	43.9	32.2	37.2	39.8	525
C20	28.1	21.9	31.7	29.2	44.1	58.4	66.9	49.4	38.6	34.1	31.9	37.5	472
EC													
OBS	51.3	40.1	64.8	86.4	87.4	88.9	85.7	93.7	96.2	79.8	82.6	69.6	927
C20	41.9	41.0	57.1	81.2	87.7	94.4	72.6	73.2	94.2	97.4	93.9	73.2	908
HA													
OBS	65.7	43.7	61.1	73.0	73.4	84.1	72.8	99.9	97.0	91.3	83.1	65.6	911
C20	44.3	43.2	55.5	78.8	78.4	86.0	79.9	82.4	108.6	106.1	92.2	64.1	920
MC													
OBS	72.6	45.9	55.1	65.2	67.5	74.5	75.2	84.2	102.8	83.2	81.7	71.4	880
C20	63.6	45.4	44.9	67.3	72.0	89.7	72.0	73.9	102.2	101.5	89.1	81.7	903

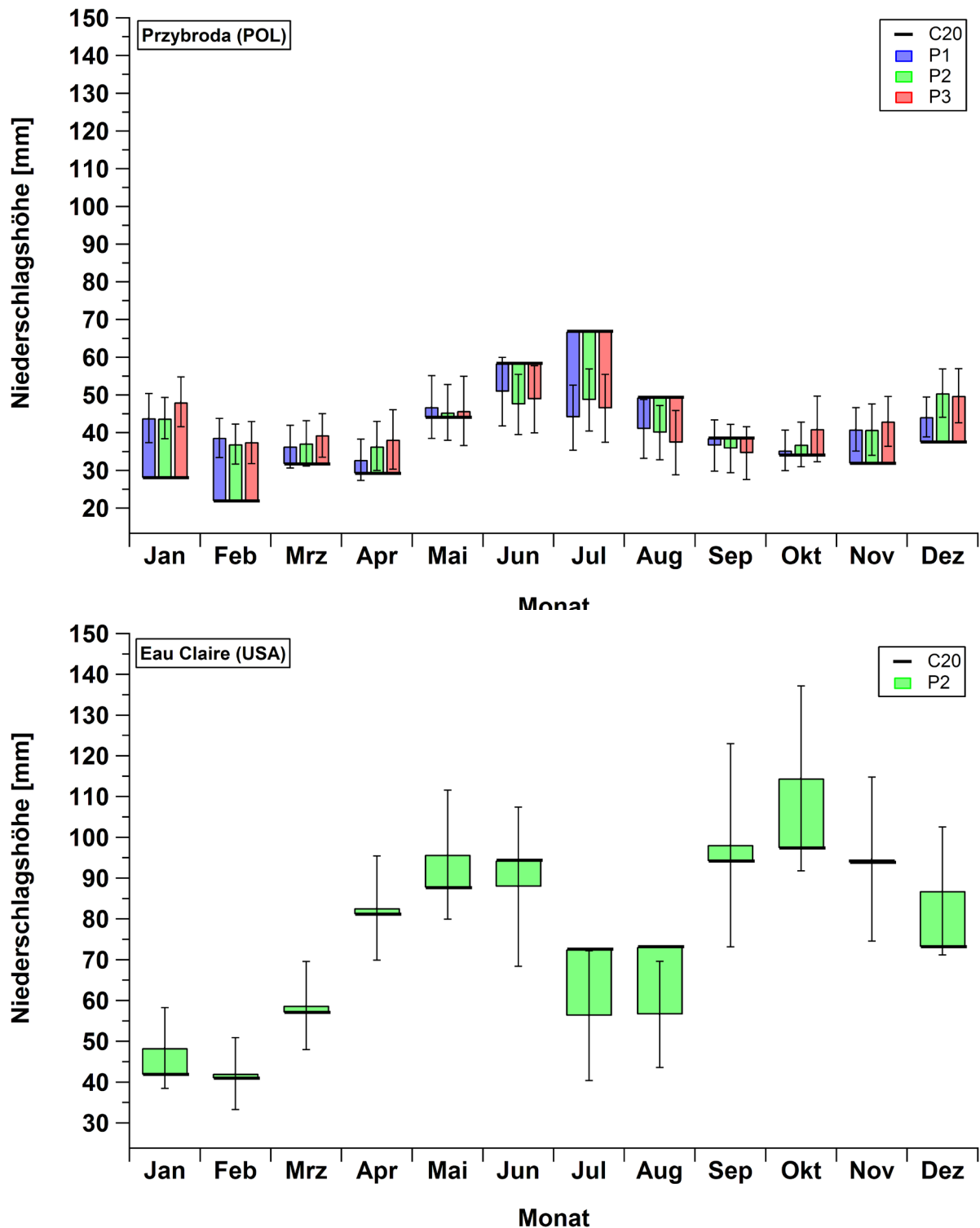


Abb. A4: Mittelwerte der Monatssummen der Niederschlagshöhe im Kontrolllauf (C20: 1971-2000) und Differenz zwischen den Zeiträumen P1 (2011-2040), P2 (2041-2070) und P3 (2071-2100) gegenüber C20 in Przybroda und Eau Claire (Mittel aus 6 RCMs in Polen und 4 RCMs in Michigan; Fehlerbalken = 95 %-Konfidenzintervalle; Differenzen zwischen Szenarien (P1, P2, P3) und C20-Lauf nicht signifikant ($p < 0.05$), außer in Polen für P1 gegenüber C20 im Januar, Februar, Juli und für P2 gegenüber C20 im Januar, Februar, November und Dezember, sowie für P3 gegenüber C20 im Januar, Februar, Juli und November).

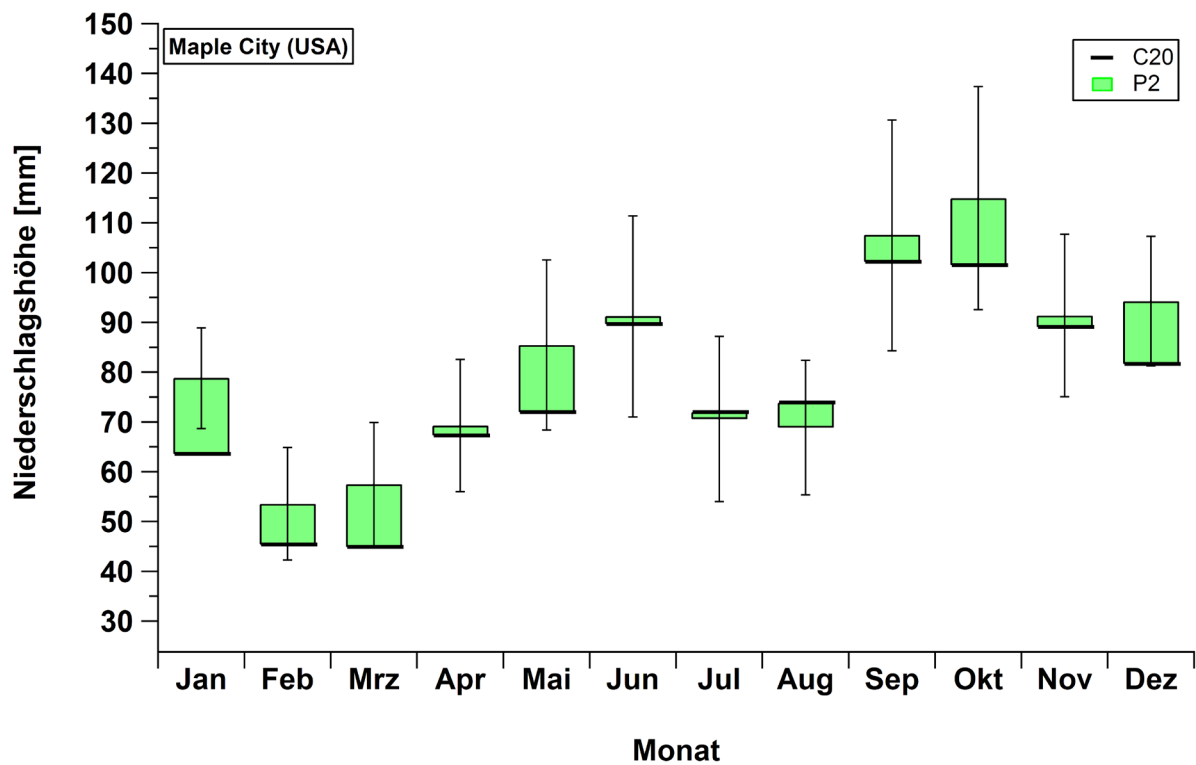
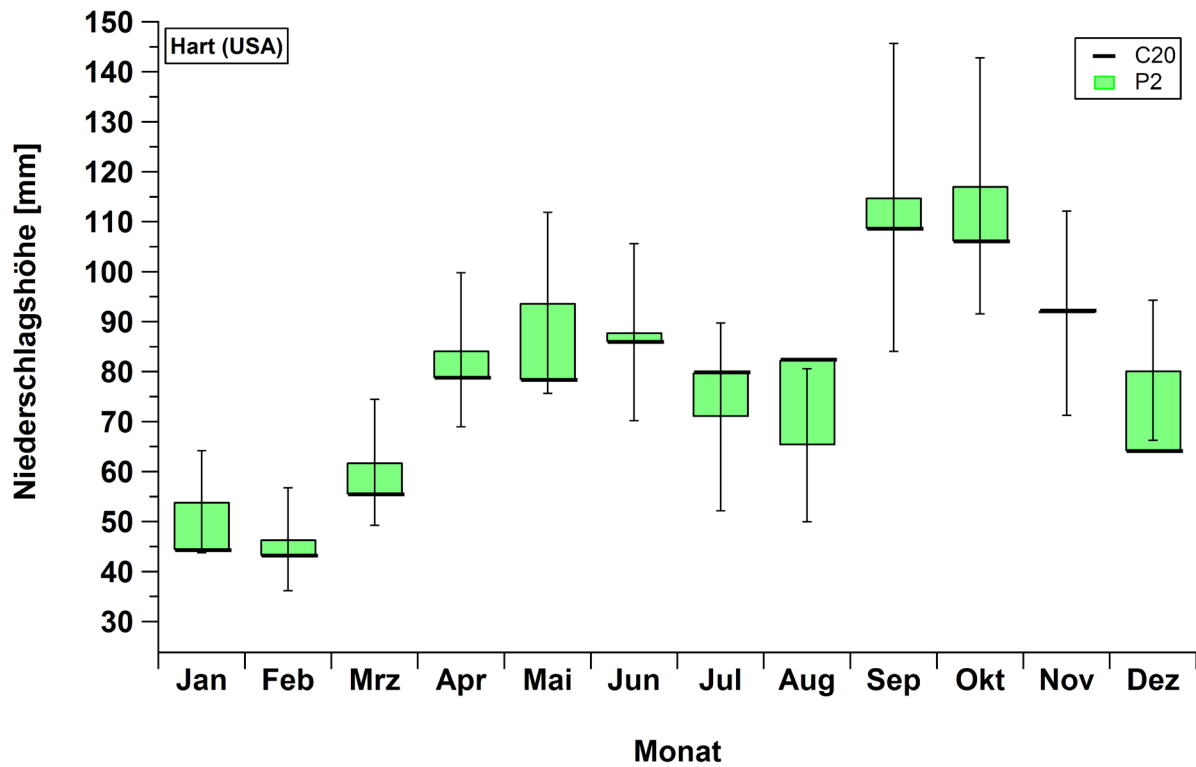
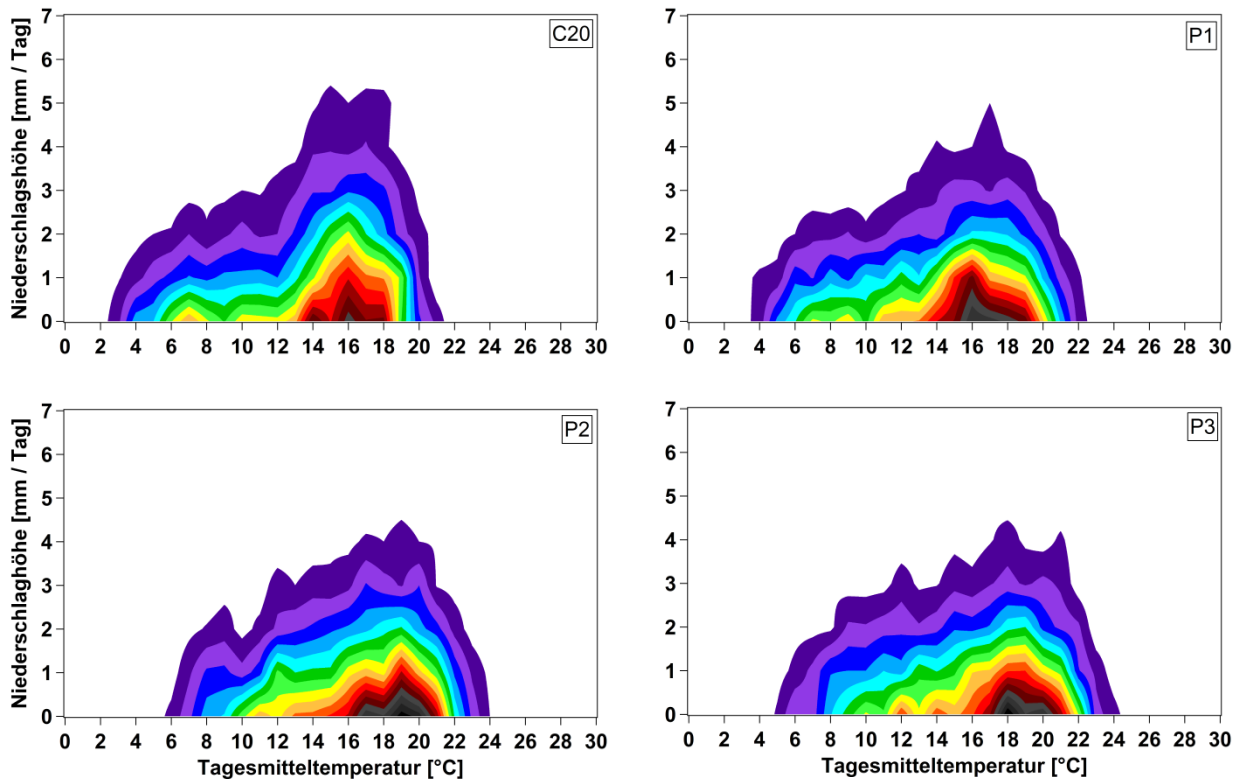


Abb. A5: Mittelwerte der Monatssummen der Niederschlagshöhe im Kontrolllauf (C20: 1971-2000) und Differenz zwischen den Zeiträumen P2 (2041-2070) gegenüber C20 in Hart und Maple City (Mittel aus 4 RCMs; Fehlerbalken = 95 %-Konfidenzintervalle; Differenzen zwischen Szenario (P2) und C20-Lauf nicht signifikant ($p < 0.05$), außer in Hart im Dezember und in Maple City im Januar).

Przybroda (POL)



Eau Claire (USA)

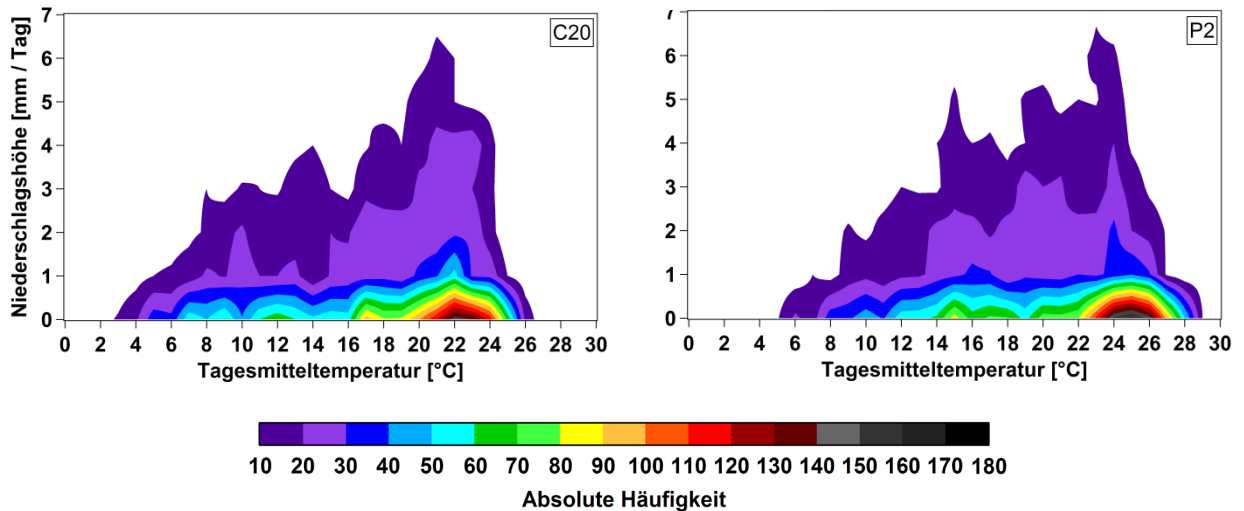


Abb. A6: Bivariate Häufigkeitsverteilung der Tagesmitteltemperatur und der täglichen Niederschlags-
höhe für den Zeitraum April bis Juli in Przybroda und Eau Claire (Mittel aus 6 RCMs in Polen und 4
RCMs in Michigan; Kontrolllauf (C20) = 1971-2000, Szenarien: P1 = 2011-2040, P2 = 2041-2070, P3
= 2071-2100).

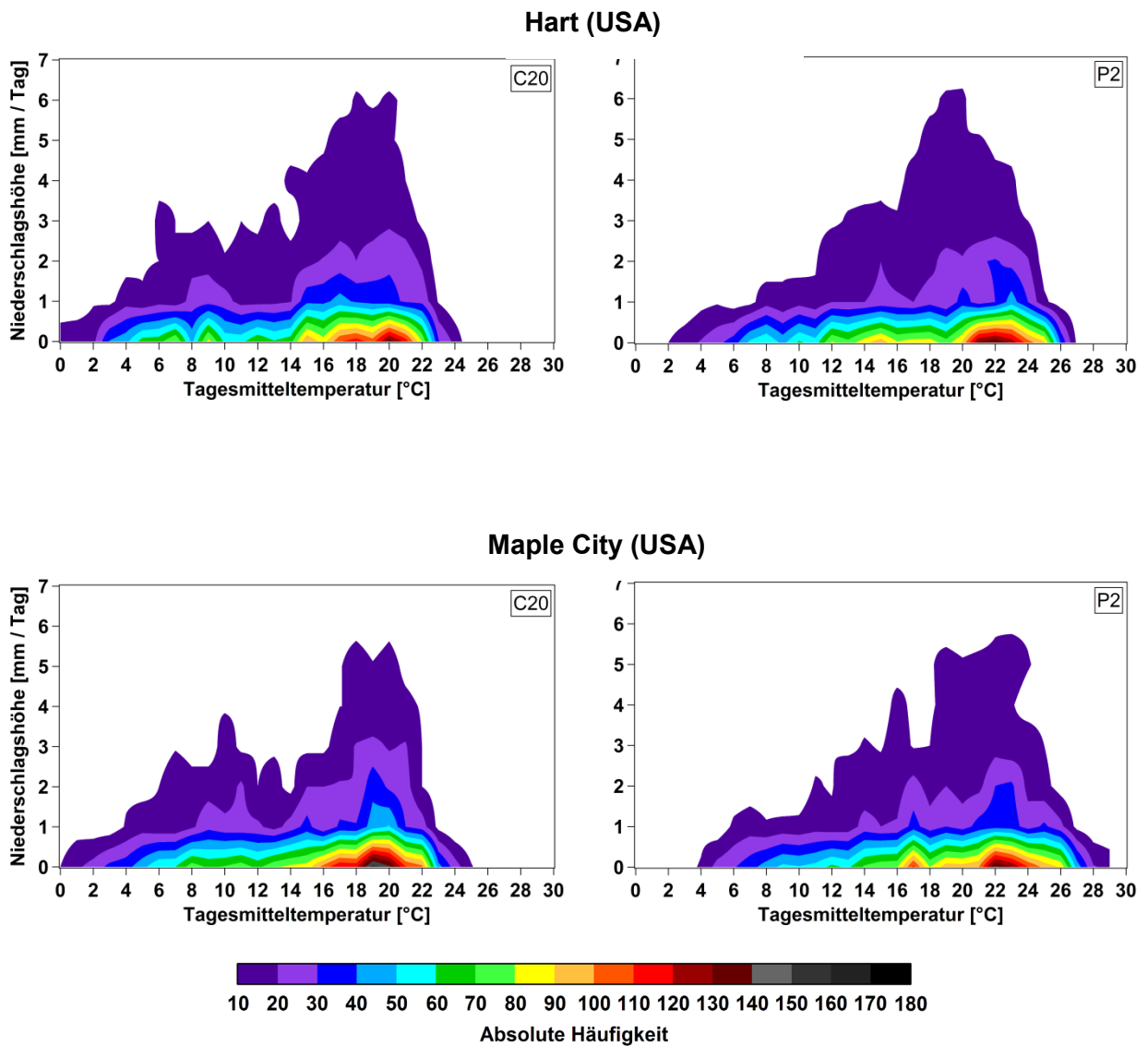


Abb. A7: Bivariate Häufigkeitsverteilung der Tagesmitteltemperatur und der täglichen Niederschlags-
höhe für den Zeitraum April bis Juli in Hart und Maple City (Mittel aus 4 RCMs; Kontrolllauf (C20) =
1971-2000, Szenario P2 = 2041-2070).

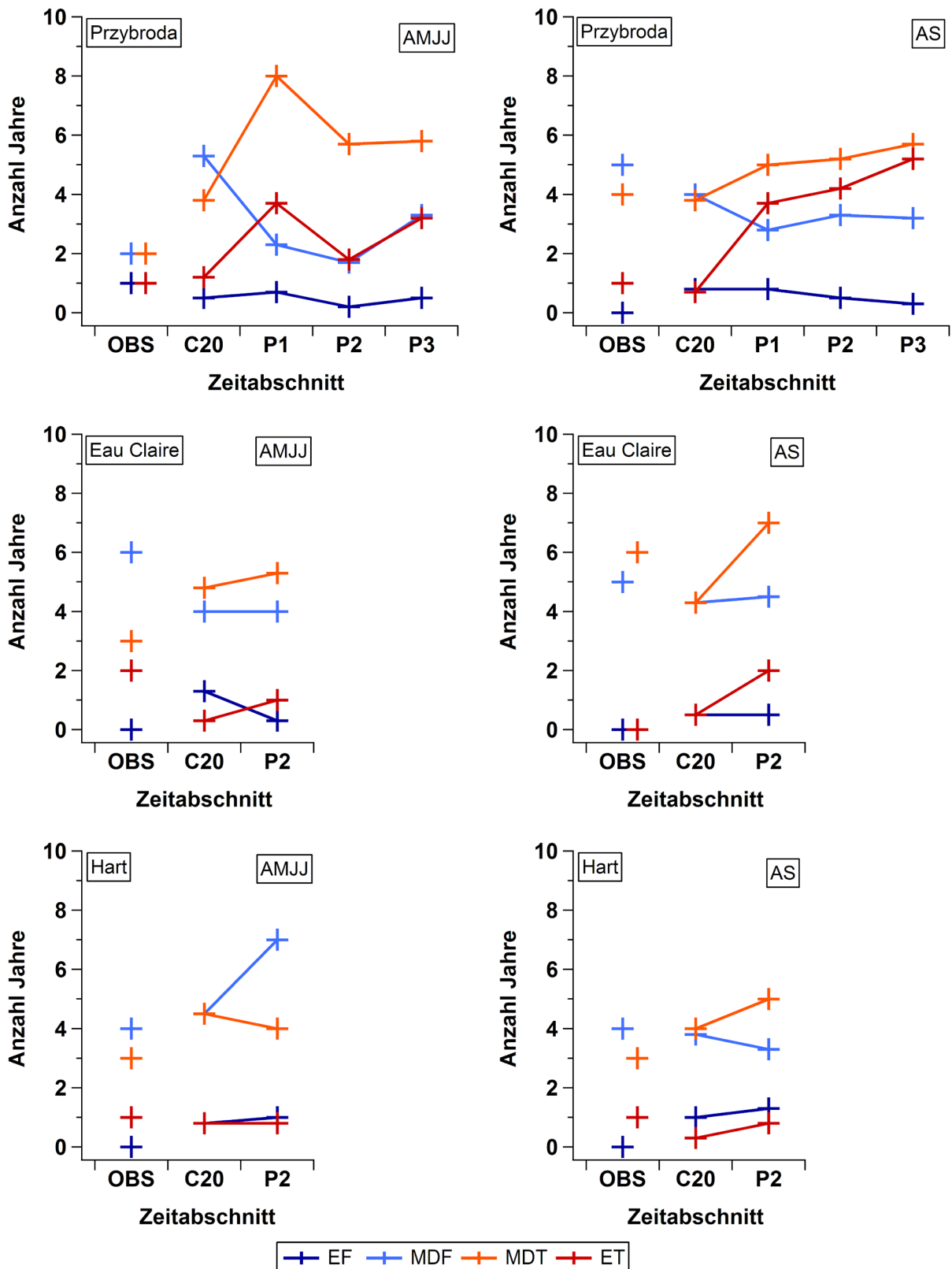


Abb. A8: Trockenheits- und Feuchtigkeitsbedingungen (*SPI* Klassen: EF = extrem zu feucht; MDF = mäßig bis deutlich zu feucht; MST = mäßig bis deutlich zu trocken; ET = extrem zu trocken) für die Monate von April bis Juli (AMJJ) und August bis September (AS) in Przybroda, Hart und Maple City (Beobachtungen (OBS) = 1971-2000; Kontrolllauf (C20) = 1971-2000, Szenarien: P1 = 2011-2040, P2 = 2041-2070, P3 = 2071-2100; Mittel aus 5 RCMs in Polen und 4 RCMs in Michigan).

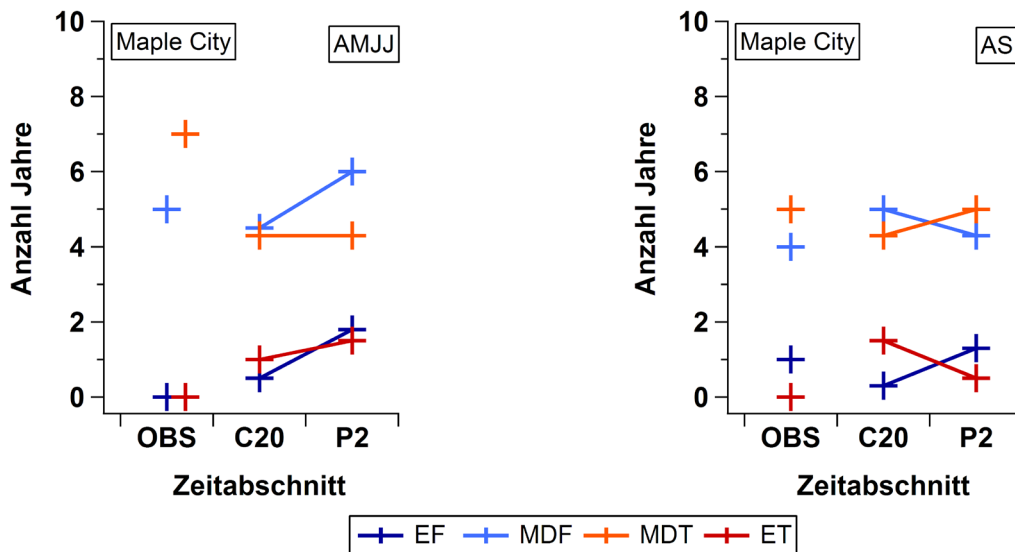


Abb. A9: Trockenheits- und Feuchtigkeitsbedingungen (*SPI* Klassen: EF = extrem zu feucht; MDF = mäßig bis deutlich zu feucht; MST = mäßig bis deutlich zu trocken; ET = extrem zu trocken) für die Monate von April bis Juli (AMJJ) und August bis September (AS) in Maple City (Beobachtungen (OBS) = 1971-2000; Kontrolllauf (C20) = 1971-2000, Szenario P2 = 2041-2070, Mittel aus 4 RCMs).

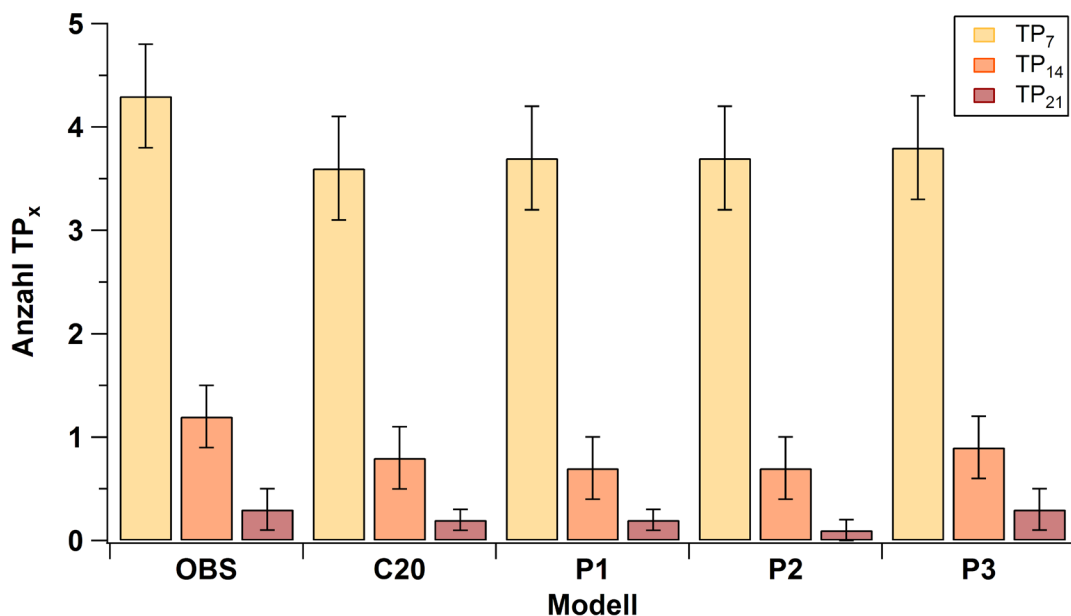


Abb. A10: Anzahl der Trockenperioden (TP_7 = mindestens 7 aufeinanderfolgende Tage ohne Niederschlagstag ($P > 1$ mm); TP_{14} = 14 Tage; TP_{21} = 21 Tage) im Zeitraum April-Juli in Przybroda (Beobachtungen (OBS) = 1971-2000; Kontrolllauf (C20) = 1971-2000, Szenarien: P1 = 2011-2040, P2 = 2041-2070, P3 = 2071-2100; Mittel aus 6 RCMs; Fehlerbalken = 95 %-Konfidenzintervalle; Differenzen zwischen Szenarien (P1, P2, P3) und Kontrolllauf (C20) nicht signifikant bei $p < 0.05$).

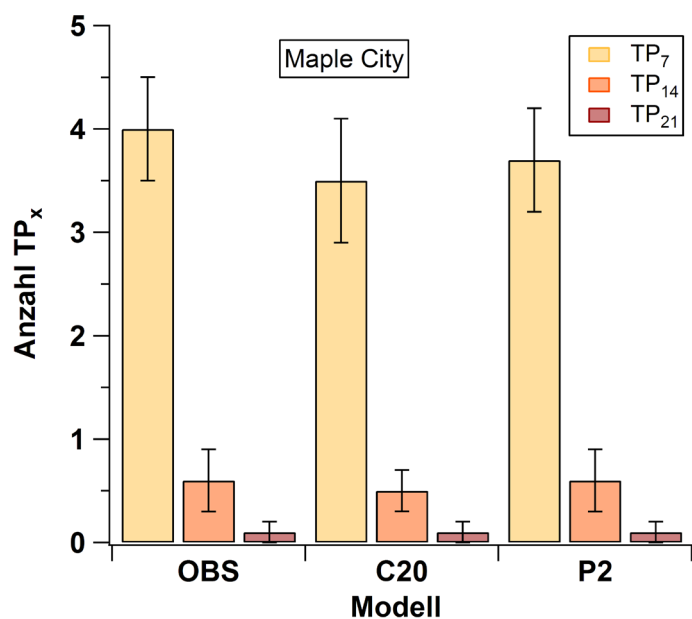
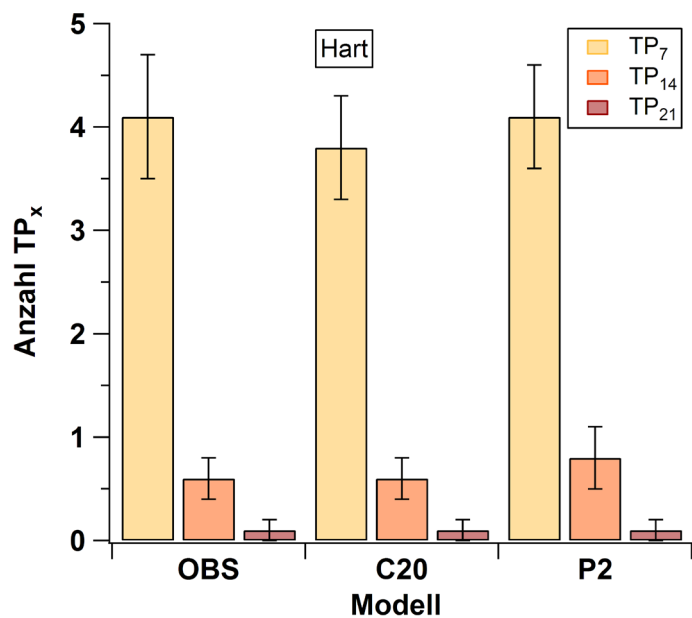
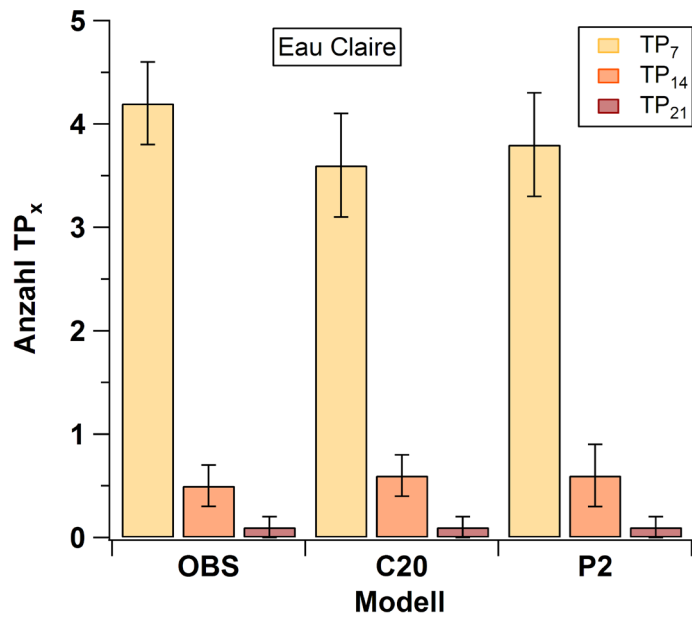


Abb. A11: Anzahl der Trockenperioden (TP_7 = mindestens 7 aufeinanderfolgende Tage ohne Niederschlagstag ; TP_{14} = 14 Tage; TP_{21} = 21 Tage) im Zeitraum April-Juli in Przybroda, Hart und Maple City (Beobachtungen (OBS) = 1971-2000; Kontrolllauf (C20) = 1971-2000, Szenario: P2 = 2041-2070, Mittel aus 5 RCMs; Fehlerbalken = 95 %-Konfidenzintervalle; Differenzen zwischen Szenario (P2) und C20-Lauf nicht signifikant bei $p < 0.05$).

Tab. A3: Mittlere Blühdauer, mittlere Anzahl Stunden von Sonnenaufgang (SA) bis Sonnenuntergang (SU) in der Blütezeit (N_{SA-SU}), mittlere Anzahl von Stunden mit Temperaturen im Bereich von $\geq 12.8-15.6$ °C (N_{FI1}), $> 15.6-18.3$ °C (N_{FI2}) und über > 18.3 °C (N_{FI3}) der Sauerkirsche in Przybroda, Eau Claire, Hart und Maple City (Beobachtungen (OBS) = 1971-2000; Kontrolllauf (C20) = 1971-2000, Szenarien: P1 = 2011-2040, P2 = 2041-2070, P3 = 2071-2100; Mittel aus 5 RCMs in Polen und 4 RCMs in Michigan; $\pm x$ = 95 %-Konfidenzintervalle; Differenzen zwischen Szenarien (P1, P2, P3) und C20-Lauf nicht signifikant ($p < 0.05$), außer für die Blühdauer in Eau Claire und Maple City.

Przybroda	OBS	C20	P1	P2	P3
Blühdauer [Tage]	13.6 \pm 1.5	13.4 \pm 0.9	13.8 \pm 1.0	13.5 \pm 0.9	14.1 \pm 1.8
N_{SA-SU} [Stunden]	191 \pm 21	188 \pm 13	192 \pm 13	184 \pm 12	180 \pm 13
N_{FI1} [Stunden]	33 \pm 6	37 \pm 6	41 \pm 6	40 \pm 6	40 \pm 6
N_{FI2} [Stunden]	34 \pm 6	32 \pm 4	35 \pm 5	32 \pm 4	33 \pm 5
N_{FI3} [Stunden]	62 \pm 15	55 \pm 9	44 \pm 9	42 \pm 9	41 \pm 9

Eau Claire	OBS	C20	P2
Blühdauer [Tage]	12.5 \pm 0.9	12.0 \pm 0.7	10.9 \pm 0.6
N_{SA-SU} [Stunden]	166 \pm 11	159 \pm 10	140 \pm 8
N_{FI1} [Stunden]	29 \pm 5	25 \pm 4	20 \pm 4
N_{FI2} [Stunden]	28 \pm 4	29 \pm 4	25 \pm 4
N_{FI3} [Stunden]	60 \pm 8	69 \pm 8	66 \pm 7

Hart	OBS	C20	P2
Blühdauer [Tage]	12.8 \pm 0.8	12.4 \pm 0.8	11.9 \pm 0.8
N_{SA-SU} [Stunden]	178 \pm 10	174 \pm 11	161 \pm 11
N_{FI1} [Stunden]	29 \pm 5	31 \pm 5	27 \pm 5
N_{FI2} [Stunden]	29 \pm 4	34 \pm 4	32 \pm 4
N_{FI3} [Stunden]	67 \pm 8	60 \pm 8	61 \pm 8

Maple City	OBS	C20	P2
Blühdauer [Tage]	12.5 \pm 0.9	12.1 \pm 0.7	11.1 \pm 0.8
N_{SA-SU} [Stunden]	175 \pm 13	167 \pm 10	149 \pm 10
N_{FI1} [Stunden]	24 \pm 5	24 \pm 4	20 \pm 4
N_{FI2} [Stunden]	25 \pm 4	26 \pm 4	22 \pm 3
N_{FI3} [Stunden]	75 \pm 9	73 \pm 6	73 \pm 5

Danksagung

Ich bedanke mich ganz herzlich bei allen, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Frank-M. Chmielewski für die Überlassung des Themas, die zahlreichen Anregungen, die jederzeit gewährte Hilfe, sowie die vertrauensvolle Zusammenarbeit. Seine hervorragende Betreuung und fachliche Unterstützung haben das Zustandekommen dieser Arbeit erst möglich gemacht.

Für die Durchführung der Versuche und Unterstützung bei der Anfertigung der Arbeit danke ich Dr. Klaus-P. Götz, bei ihm habe ich stets viele Anregungen und gute Hinweise in einer sehr offenen und angenehmen persönlichen Atmosphäre bekommen.

Ich danke Dr. Klaus Blümel für die mathematisch-statistische Beratung und die Betreuung im Gebiet der Modellierung.

Weiterhin gilt mein Dank den Mitarbeitern des CLIMARK-Projekts für die Bereitstellung des Datenmaterials und der fachlichen Unterstützung.

Allen Mitarbeitern am Fachgebiet für Acker- und Pflanzenbau an der Humboldt-Universität zu Berlin, sei für die freundliche Aufnahme, die ständige Offenheit für Fragen und Diskussionen, sowie die technische Assistenz gedankt.

Ich danke Frau Professor Manuela Zude und Herrn Professor Massimo Tagliavini für die freundliche Übernahme der Gutachten.

Nicht vergessen möchte ich die beständige Hilfe und Unterstützung aus dem Familien- und Freundeskreis. Meinen Eltern sei nicht nur für den finanziellen Beistand gedankt, sondern auch für das Zuhören, Aufmuntern und Motivieren in schwierigen Phasen meines gesamten Studienverlaufs. Danken möchte ich abschließend meiner Freundin Tanya für die Ermutigungen, ihre Geduld und das Verständnis während der Anfertigung der Arbeit.